

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie (Bakalářské studium)

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Jiří KOCUM

Dálkový průzkum jako indikátor změn struktury půdního pokryvu

Remote sensing as indicator of Soil structure changing

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Luděk Šefrna, CSc.

Praha 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 8. 5. 2018

.....

Jiří Kocum

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce RNDr. Luděkovi Šefrnovi, CSc., za věnovaný čas, pomoc při shromažďování dat, cenné rady a připomínky. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

Zadání bakalářské práce:

Název práce:

Dálkový průzkum jako indikátor změn struktury půdního pokryvu.

Cíle práce:

Tato práce podává přehled o spektrálním chování půdy, možnostech využití metod dálkového průzkumu Země v pedologii a jejich využití v praxi. Cíl praktické části byl zmapovat vybrané území a nasbírat informace o zdejší mozaikovitosti půdy viditelné z některých leteckých snímků. Cílem práce je porovnat data shromážděná pomocí dálkového průzkumu s informacemi z terénního šetření a odebraných vzorků a na základě toho vysvětlit podstatu, příčiny a možný budoucí vývoj sledovaného jevu a posoudit, zdali je dálkový průzkum vhodnou metodou na řešení této problematiky.

Použité pracovní metody, zájmové území a datové zdroje

Zájmové území leží u obce Kleneč v Ústeckém kraji. Jedná se o zemědělsky využívanou půdu ležící na bývalé pískové říční terase Labe. Zdrojem dat jsou pedologické sondy provedené na tomto území, odebrané vzorky půdy, mapové podklady z geoportálu ČÚZK, portálu Mapy.cz a satelitní snímky z družice Sentinel-2. Součástí práce je rešerše na téma spektrálního chování půdy a využití metod dálkového průzkumu v pedologii.

Datum zadání:

Jméno studenta: Jiří Kocum

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Luděk Šefrna, CSc.

Podpis vedoucího práce:

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou půdních vlastností, jejich vlivu na spektrální odrazivost půdy a využitím metod dálkového průzkumu Země v pedologii. Cílem práce je na vybraném území obce Kleneč v Ústeckém kraji, za pomoci terénního šetření a dostupných dat dálkového průzkumu vysvětlit příčinu a odhadnout možný vývoj mozaikovitosti zdejších půd, viditelných na leteckých snímcích. Na základě dosažených výsledků pak zhodnotit, zdali jsou metody dálkového průzkumu vhodnou aparaturou na řešení této problematiky. Pro tento účel byly nasbírány data z terénních šetření, leteckých a satelitních snímků. Tyto informace byly následně porovnávány a vyhodnoceny. Výsledky ukázaly odlišnost v půdních vlastnostech, které způsobují rozdílnou schopnost dlouhodobě vázat vodu. Rozdílný obsah vody v půdě následně ovlivňuje spektrální chování půdy, který se na leteckých a satelitních snímcích projeví formou mozaiky.

Klíčová slova:

Dálkový průzkum, půda, pedologie, vlhkost, struktura

Abstract

This thesis is about soil properties, their influence on soil spectral reflectance and Remote Sensing (RS) in pedology. The aim of the thesis is to explain the cause and to estimate the possible future development of the mosaics of local soils, which is visible in aerial photographs, on the selected territory of Kleneč in the Ústí nad Labem Region, by using data from the field survey and RS. Based on the results, evaluate if the methods of RS are suitable apparatus for solving this problem. For this purpose, data from field surveys, aerial and satellite images were collected. This information was compared and evaluated. The results showed a difference in soil properties that cause a different ability to bond water over time. Difference in water content in soil influence the spectral reflectance of the soil, which is reflected in aerial and satellite imagery in the form of a mosaic.

Key words:

Remote Sensing, Soil, pedology, moisture, structure

Obsah

SEZNAM TABULEK.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
1. Úvod.....	11
2. Půda.....	12
2.1 Vývoj půd v holocénu.....	12
2.2 Půdotvorné faktory	13
2.2.1 Půdotvorný substrát	13
2.2.2 Klima.....	15
2.2.3 Biologický faktor	15
2.2.4 Vliv člověka	15
2.3 Degradace půd	16
3. Dálkový průzkum Země.....	17
3.1 Historie DPZ.....	18
3.2 Stručný popis principu DPZ	20
3.3 Oblasti spektra používané v DPZ	21
3.4 Spektrální vlastnosti půd	22
3.4.1 Tvar spektrální křivky odrazivosti půd	23
3.5 Faktory ovlivňující spektrální chování půdy	24
3.5.1 Uhličitany.....	24
3.5.2 Organická hmota	24
3.5.3 Voda.....	25
3.5.4 Půdní textura a morfologie povrchu	25
3.5.5 Vegetace a rostlinné zbytky	25
3.6 Využití DPZ v pedologii a biogeografii	26
3.6.1 Monitoring eroze.....	26
3.6.2 Měření půdní vlhkosti	27
3.6.3 Precision agriculture	28
4. Fyzickogeografický popis lokality	30
5. Metodika.....	32
5.1 Terénní průzkum.....	34
5.2 Pedologické sondy	37
5.3 Zpracování odebraných vzorků	37
5.4 Analýza leteckých snímků.....	43

5.5 Analýza DMR.....	43
5.6 Analýza satelitních snímků.....	46
6. Výsledky a diskuze.....	47
7. Závěr.....	55
Zdroje	56
SEZNAM PŘÍLOH	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Schématické znázornění retrográdního vývoje půd v holocénu.....	14
Tabulka č. 2: Spektrální obory dálkového průzkumu Země	21
Tabulka č. 3: Vybrané družice používané v přírodovědných oborech.....	29
Tabulka č. 4: Seznam vybraných vegetačních indexů	30
Tabulka č. 5: Geomorfologické členění zájmového území.....	31
Tabulka č. 6: Naměřené hodnoty z odebraných vzorků pomocí Kopeckého válečků	39
Tabulka č. 7: OHV, OOV a MVKK z naměřených hodnot v Tabulce č. 6.....	40
Tabulka č. 8: Hodnoty OH a příslušné charakteristiky odvozené z těchto hodnot	41
Tabulka č. 9: Kritéria a hodnocení MVKK.....	42
Tabulka č. 10: Strukturní stav humusového horizontu u středně těžkých a těžkých půd	42
Tabulka č. 11: Kritéria určení půdního druhu na základě OH	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Zájmové území.....	32
Obrázek č. 2: Zájmové území v odstínech šedi.....	33
Obrázek č. 3: Vymezené kategorie.....	34
Obrázek č. 4: Pedologické sondy, 1. terénní šetření	35
Obrázek č. 5: Pedologické sondy, 2. terénní šetření	36
Obrázek č. 6: Pravidelné kruhové útvary	36
Obrázek č. 7: DMR vytvořený z LiDARových dat DMR 5G.....	44
Obrázek č. 8: Sklonitost terénu	44
Obrázek č. 9: Orientace svahů.....	45
Obrázek č. 10: TIN model.....	46
Obrázek č. 11: Sonda v místě spadající do kategorie – světlá místa.....	49
Obrázek č. 12: Sonda v místě spadající do kategorie – šedá místa	49
Obrázek č. 13: Sonda v místě spadající do kategorie – tmavá místa	50
Obrázek č. 14: Pole krátce po úhrnu srážek	51
Obrázek č. 15: Pole po kratším odstupu po srážkovém úhrnu	51
Obrázek č. 16: Výřez snímku z roku 1949 s viditelným sadem.....	52
Obrázek č. 17: Zprůměrovaný index NDVI.....	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČÚZK: Český Úřad Zeměměřický a Katastrální

DMR 5G: Digitální Model Reliéfu 5. Generace

DPZ: Dálkový Průzkum Země

GIS: Geografické Informační Systémy

KPP: Komplexní Průzkum Půd

LiDAR: Light Detection And Ranging

LWIR: Long-Wave InfraRed

MWIR: Middle-Wave InfraRed

NDMI: Normalized Difference Moisture Index

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

PA: Precision Agriculture

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

SWIR: Short-Wave InfraRed

TIN: Triangulated Irregular Network

USLE: Universal Soil Loss Equation

VGHMÚř: Vojenský Geografický a HydroMeteorologický Úřad

VNIR: Visible and Near InfraRed

VÚMOP: Výzkumný Ústav Meliorací a Ochrany Půdy

1. Úvod

Tato práce se zabývá půdní mozaikou vyskytující se v místech bývalého toku Labe západně od Řípu. Tato problematika je řešena na vybraném území u obce Kleneč v Ústeckém kraji na zemědělsky využívané ploše. Hlavním cílem této práce je za pomoci metod dálkového průzkumu a terénních šetření vysvětlit příčinu tohoto jevu a odhadnout možný budoucí vývoj. Na základě výsledků zhodnotit, zdali jsou metody dálkového průzkumu vhodným aparátem pro řešení těchto jevů. Tato práce by měla potvrdit nebo vyvrátit hypotézu: mozaikovitost zdejších půd je dána rozdílnou schopností půd dlouhodobě zadržovat vodu v důsledku odlišných půdních vlastností.

Rešerše je zaměřena na téma spektrálních vlastností půd a využití metod dálkového průzkumu v pedologii. V teoretické části je stručně popsána historie vývoje půd v holocénu s faktory, které tento vývoj ovlivňovaly a současná degradace půd. Následuje popis dálkového průzkumu země, dále jen DPZ, se zaměřením na monitoring půd a využití těchto metod v pedologii. V praktické části jsou popsány metody, které byly použity pro získání, zpracování a vyhodnocení dat.

Vedlejším cílem této práce bylo zjistit, zdali i běžný pedolog, který nedisponuje nejnovějším vybavením, se touto problematikou může zabývat a dojít k uspokojivým výsledkům. Za tímto účelem byla všechna data pořízena buď z terénního šetření nebo z volně dostupných zdrojů. Pro analýzu vzorků půdy byly použity pouze základní postupy, které jsou poměrně snadno proveditelné i v hůře vybavené laboratoři. Vynechány byly placené zdroje dat, možnost využití Unmanned Aerial Vehicle, dále jen UAV, které by bylo v takto malém měřítku výhodou a pokročilé chemické analýzy vzorků. Výjimkou je využití softwaru ArcGIS® 10.6. Analýzy provedené v tomto programu však byly také pouze základní a stačil by na ně volně dostupný GIS software jako například QGIS nebo GRASS GIS.

2. Půda

„Půda je jedním ze základních neobnovitelných přírodních zdrojů, který plní řadu funkcí, významných pro rozvoj společnosti“ (Němeček, Smolíková, Kutílek 1990). Půda tvoří svrchní část pevného zemského povrchu – pedosféru. Ta vzniká na tzv. kůře zvětrávání. Pevný zemský povrch vystavený účinkům atmosféry a hydrosféry produkuje zvětraliny, ty půdou ještě nazvat nemůžeme. O půdě hovoříme až když se do procesu zapojí i živé organismy (mikroorganismy, vegetace, edafon) (Tomášek 2007).

V. V. Dokučajev, jeden ze zakladatelů světového půdoznalství, půdu považuje za „samostatný přírodně-historický útvar, který vzniká a vyvíjí se zákonitým procesem, jenž probíhá působením několika půdotvorných činitelů“ (cit. v Tomášek 2007, s. 11). V. Novák, jeden ze zakladatelů českého půdoznalství půdu popisuje jako „přírodní útvar, který se vyvíjí z povrchových zvětralin kůry zemské a ze zbytků ústrojenců a jehož stavba a složení jsou výsledkem podnebí a jiných faktorů půdotvorných“ (cit. v Tomášek 2007, s. 11). Ministerstvo životního prostředí (2008) definuje půdu jako „samostatný přírodní útvar vzniklý z povrchových zvětralin zemské kůry a z organických zbytků za působení půdotvorných faktorů. Je životním prostředím půdních organismů, stanovištěm planě rostoucí vegetace, slouží k pěstování kulturních rostlin. Je regulátorem koloběhu látek, může fungovat jako úložiště, ale i zdroj potenciálně rizikových látek.“

2.1 Vývoj půd v holocénu

Kvartérní uloženiny, půdy a odnosné pochody se střídají v zákonitém pořadí a vytvářejí sledy, které se opakují podle výkyvů podnebí. „Retrográdní vývoj půd (viz. Tabulka 1) je pochod, při němž se v jednom časovém úseku tvořily nejprve silněji nebo silně zvětralé půdy, které byly postupně oddělené vzájemně krátkodobou sedimentací, vystřídány slaběji až slabě vyvinutými půdami“ (Němeček, Smolíková, Kutílek 1990). Tento pochod je odrazem kvartérního klimaticko-sedimentačního a půdotvorného cyklu a lze jej sledovat jak v holocénu, tak i v průběhu pleistocénu. Během tohoto cyklu se měnily všechny půdotvorné faktory. Studená období se vyznačují nejen suchým podnebím, ale i omezeným rozvojem života, vznikem půdních substrátů a změnami v reliéfu. Během tohoto období byla tvorba půd omezena na minimum. V teplých obdobích převažoval sedimentační a odnosný klid a silný rozvoj života. Za těchto podmínek se půda mohla plně rozvíjet (Němeček, Smolíková, Kutílek 1990).

Úplný sled fosilních půd v sedimentárních sériích takřka nikde neobjevíme. Výjimkou mohou být pouze sprašové série suchých oblastí. Ty nám poskytují jak časový sled těchto událostí, tak i nejúplnější obraz cyklického vývoje. Spraš je substrát, který starší půdy dobře konzervuje, citlivě reaguje na všechny změny podnebí i vegetace, tudíž jsou v ní zaznamenány i mírné výkyvy ve formě slabě vyvinutých půd (Němeček, Smolíková, Kutílek 1990).

2.2 Půdotvorné faktory

Z definic vyplývá, že půda vzniká působením půdotvorných činitelů, ty pak dále můžeme dělit do dvou skupin – půdotvorné faktory a podmínky půdotvorného procesu. Mezi půdotvorné faktory patří substrát (matečná hornina), podnebí, biologický faktor, podzemní voda a antropogenní činnost. Mezi podmínky půdotvorného procesu řadíme utváření terénu (reliéf) a stáří půdy. Do půdotvorných procesů řadíme zvětrávání, humifikaci, eluviaci, iluviaci, solončakování a slancování (Smolík 1957, Tomášek 2007).

2.2.1 Půdotvorný substrát

Půdotvorný substrát neboli matečná hornina, je výchozím materiálem, ze kterého půda vzniká. Petrologické složení substrátu ovlivňuje rychlost tvorby půd (rychlost zvětrávání), hloubku půdy a její zrnitost, která následně ovlivňuje i její fyzikální, fyzikálně-chemické, biologické a další vlastnosti. Chemické složení substrátu má vliv na rychlost vyluhování půdy na základě obsahu vápníku a hořčíku. Minerální sílu substrátu dodává draslík a fosfor. Důležitá je také přítomnost uhličitánů jednomocných kationtů, a to hlavně sodíku a lehce rozpustných solí – síranů a chloridů, které mohou způsobovat zasolení půd. Substráty nejčastěji dělíme dle jejich geologického stáří, které má vliv na jich stupeň zpevnění, jež dále ovlivňuje tvorbu půdy, její vývoj, znaky, vlastnosti a režimy (Smolík 1957, Tomášek 2007).

Nezpevněné substráty jsou v našich podmínkách většinou čtvrtohorního (kvartérního) a z části třetihorního stáří. Starší horniny jsou buď pevné nebo v různém stupni zpevnění a často je nazýváme horninami skalního podkladu. Setkat se můžeme také se smíšenými substráty, které tvoří směs původem velmi odlišných substrátů nebo s tzv. dvojsubstrátem. Jedná se o mělký čtvrtohorní překryv starší spodiny. Častým příkladem je spraš uložená na terasovém štěrku opuce nebo jiném materiálu (Tomášek 2007). Tento případ se vyskytuje taktéž na sledovaném území.

Tabulka č. 1: Schématické znázornění retrográdního vývoje půd v holocénu

Chronologie	Sedimentace a tvorba půd	Stanovištní poměry
subrecent	iniciální stádia černozemí	kulturní step
subatlantik	intenzivní odnos, postihující zejména čerstvé vápnité substráty (přemisťování detritu)	intenzivní zemědělství
	značný přínos ronového materiálu; půdní tvorba; slabě vyvinutá černozem s hnědým panterováním	sekundární kulturní lesostep; pastviny s hojnými zbytky lesa
subboreál	pokročilá půdní eroze a vznik poloh z půdních sedimentů	pokračující odlesnění a rozšiřování obdělávaných ploch
epiatlantik	tvorba humózních horizontů z povrchových partií illimerizovaných půd – vznik pseudočernozemí	částečné odlesnění a zastepnění krajiny (neolitické osídlení); vznik kulturní lesostepi
starý až střední holocén	sedimentační a odnosný klid, nerušené zvětrávání spraše – tvorba typických parahnědozemí	úplné zalesnění krajiny – smíšený listnatý les – klima podstatně vlhčí než v současné době
würmský pleniglaciál	eolická sedimentace, tvorba spraše	studená sprašová step, pokrývající široké areály
	deluvioeolická sedimentace, místy soliflukce; tvorba rytmičky zvrstvených mrazových zvětralin	chladná step s hojnými plochami bez vegetace

Zdroj: Němeček, Smolíková, Kutílek 1990

2.2.2 Klima

Klima České republiky je primárně dáno její polohou v mírném pásu, i přesto se podnebné poměry v některých částech území liší. To se následně projevuje v odlišném vývoji půd na těchto územích. Klima v České republice přechází ze subatlantického na západě do subkontinentálního klimatu na východě republiky. Závisí především na nadmořské výšce a expozici svahů vůči vzdušným prouděním. Charakter klimatu je určen zejména průměrnými teplotami a jejich průběhem v roce, úhrnem srážek a jejich ročním rozložením. Dalšími faktory mohou být převládající směr větru, mocnost a délka trvání sněhové pokrývky. Množství srážek určuje, zdali se z půdy vynáší látky vztlínající vodou (aridní klima) nebo vyluhováním (humidní klima). Obecně lze říci, že teplé klimatické oblasti jsou příznivé pro černozemní případně zasolovací půdotvorné procesy, v mírně teplých oblastech převažují procesy vnitropůdního zvětrávání a illimerizace a v oblastech chladných se uplatňují procesy podzolizační (Tomášek 2007).

2.2.3 Biologický faktor

Biologický faktor působí zejména prostřednictvím vegetace, která je spolu s edafonem jediným dodavatelem organické hmoty pro tvorbu humusu. Na našem území najdeme dva hlavní vegetační útvary, které zásadně ovlivňují vývoj půd. Původní stepní nebo lesostepní porosty díky svým bohatě rozvinutým kořenovým systémům podporují humifikaci přímo v minerální hmotě půdy, akumulují zde minerální látky a tím pomáhají zvýšit odolnost vůči vyluhování. Oproti tomu lesní porosty, které mají chudší kořenové systémy a veškerý opad se hromadí na povrchu půdy, produkují menší množství hodnotného humusu a silným okyselením přispívají k půdnímu vyluhování. Vedle vyšších rostlin se na tvorbě půd podílejí také mikroflóra a edafon – fytoedafon a zooedafon (Tomášek 2007).

2.2.4 Vliv člověka

Vliv člověka na půdu se projevuje různými způsoby, a to jak pozitivními, tak negativními. Svou činností může zvýšit hloubku prohumózněné vrstvy, způsobit kladné změny ve fyzikálních, fyzikálně-chemických i biologických vlastnostech půdy. Svou kulturní činností ale přináší i nežádoucí jevy jako je úbytek humusu ve svrchní části půdy, zhutňování půdy, kontaminace a napomáhá a urychluje procesy eroze a degradace půd (Tomášek 2007).

2.3 Degradace půd

„Půda je jeden z nejvýznamnějších přírodních zdrojů. Umožňuje existenci veškerého života, rozvoj civilizací a pro existenci lidstva je a bude nezastupitelná“ (Vašků 2008). Jedná se o útvar na rozhraní živé a mrtvé hmoty, čímž se liší od geologických substrátů, hornin a zemin. Stejně jako živočichové má i půda jakousi schopnost samoregulace. Poruší-li se na základě nějakého zásahu její rovnováha, vrátí se časem do původního stavu. Je-li zásah příliš výrazný a překročí určité meze, dojde k její degradaci (Vašků 2008).

Půda je výsledkem působení klimatu, geologického substrátu, vodního režimu, organismů, reliéfu a času. Velice významným faktorem ovlivňujícím půdu se stává antropogenní činnost. Člověk obhospodařuje půdu již od neolitu. Tam kde je intenzivně obdělávána získává půda řadu jiných vlastností, mnohdy příznivých ale často tyto změny vedou k její degradaci. V našich podmínkách je nejčastější příčinou degradace půd vodní eroze. Vodní eroze nabrala na významu hlavně po období tzv. kolektivizace, po které došlo ke sloučení rozdrobených pozemků do větších jednotných celků, rozorání mezí, zrušení polních cest a změně skladby kultur. Zatím co kdysi každý zemědělec používal vlastní osevní postup a měl tedy na svém poli odlišnou plodinu od ostatních, dnes se tatáž plodina pěstuje na několika násobně větších plochách, které v důsledku odstranění mezí jsou na ukloněných svazích daleko náchylnější k erozi (Vašků 2008).

V dnešní době dochází na našem území ke značné degradaci půd. Dešťové srážky z půdy odplavují jemné částice a humus. Zejména nedostatek CaCO_3 pak vede k okyselování půd. Při přívalových srážkách dochází k odnosu části humusového horizontu a tím se zmenšuje mocnost půdního profilu. Hloubka ornice může být i 35 cm, v mělkých půdách to znamená přiorávání geologického substrátu do půdy. Spolu s vyplavováním jemných částic to vede ke změně skeletovitosti. Půda začíná být hrubší, šterkovitější, kamenitější a s menším obsahem humusu. To zapříčiní zhoršení fyzikálních, chemických i biologických vlastností. Taková půda pak hůře drží vodu a živiny, snáze vysychá a z nevyčerpatelného přírodního zdroje se snadno může stát zdroj vyčerpatelný, jelikož obnova půdy může trvat i několik tisíc let (Vašků 2008).

Velkou měrou se na degradaci půd podílí sami zemědělci. Dnešní způsob obhospodařování pozemků se odvíjí hlavně od maximálního možného zisku, a ne od zažitých osevních postupů. Mnoho zemědělců hospodaří pouze na pronajatých pozemcích, nevlastní je, tudíž je zajímá spíše zisk než stav daného pozemku. Pokud pozemek ztratí svou úrodnost, přesunou se na pozemek jiný. Od poloviny 19. století byl v Čechách provozován úhorový

systém. Při něm byla půda po dvou sklizních uhořena. Následně se prosadil Norfolkský systém, ten umožňoval na jednom místě pěstovat sled různých plodin po dlouhou řadu let. Těchto plodin po sobě mohlo být 7 až 12. Dnes se často střídají plodiny pouze dvě – řepka a nějaký druh obilniny. Tím se půda rychle vyčerpává a aby zůstala stále úrodnou, musí se vše dohánět průmyslovými vstupy (Vašků 2008).

3. Dálkový průzkum Země

S tím, jak společnost roste a vyvíjí se, narůstá i tlak na okolní prostředí. Následky tohoto tlaku jsou např. zvýšené nároky na přírodní a hospodářské zdroje, znehodnocování životního prostředí atd. DPZ je vhodnou metodou, jak zefektivnit a urychlit vyhledávání nových zdrojů, stejně tak monitorovat stav životního prostředí okolo nás (Murdych 1985).

Dálkový průzkum, v cizojazyčných literaturách uváděn jako Remote Sensing (anglická literatura), télédétection (francouzská literatura), Fernerkundung (německá literatura) a distancionnoje zondirovanije (ruská literatura), je definován mnoha různými způsoby. Počínaje velmi rozsáhlými, jak uvádí Murdych (1985): „V širším významu jde o měření nebo získávání informací o vlastnostech objektů nebo jevů záznamovým zařízením, které není ve fyzickém nebo intimním kontaktu se studovaným objektem nebo jevem; znamená to použití zařízení na dálku (z letadla, družice, případně lodi) a znázornění jeho výstupu k získání informací o prostředí, jako je např. měření silového pole, elektromagnetického záření nebo akustické energie. Technika využívá takových zařízení, jako jsou (fotografické) komory, lasery, přijímače radiových vln, sonary, seizmografy, gravimetry, magnetometry a radiometry“ nebo Sabins (1978): „Dálkový průzkum Země může být definován jako shromažďování informací o objektech bez fyzického kontaktu s nimi. Letadla a družice jsou běžnými nosiči, ze kterých se měření na dálku provádějí. Termín dálkový průzkum je omezen na metody, které využívají elektromagnetické záření jako prostředku ke zjišťování objektů a k měření jejich charakteristik.“ Stručněji DPZ definuje např. Kolář (2008): „Dálkový průzkum Země je vědní obor, který se zabývá sběrem informací o zemském povrchu bez přímého kontaktu s ním. K tomu slouží měření intenzity odraženého a emitovaného záření od jednotlivých objektů.“

Definice DPZ je nespočet, avšak všechny mají společné tvrzení, že se jedná o pozorování objektu na zemi, Země samotné nebo jiného vesmírného tělesa, aniž by pozorovatel

nebo přístroj, kterým je pozorování prováděno, byl ve fyzickém kontaktu s daným objektem nebo tělesem. Liší se hlavně v názoru, které procesy do DPZ ještě patří a které již nikoli. Zatímco některé definice mluví o DPZ jakožto pouze o pořizování snímků, jiné započítávají i následné zpracování a jejich interpretaci. Setkat se můžeme i s názorem, že do dálkového průzkumu patří taktéž vývoj a konstrukce snímkovacích zařízení (Čapek 1988). Nalezneme také odchylky v zahrnutých metodách, které se pro DPZ využívají. Autoři většinou definují DPZ na základě sběru a vyhodnocení informací odraženého nebo emitovaného elektromagnetického záření. Někteří autoři jako např. Murdych (1985) vnímají DPZ komplexněji a zahrnují sem i měření silového pole.

Největší předností DPZ na rozdíl od běžného monitorování během terénního průzkumu je, že dokáže poskytnout poznatky o makrostruktuře pozorovaných jevů. Snímky pořízené z družic nebo paluby letadla či z jiných nosičů nám poskytují ucelený pohled na celé sledované území a umožňují nám studovat / chápat věci v širší souvislosti. Pořizování snímků znamená také úsporu času a nákladů oproti běžným terénním průzkumům. Během fyzického průzkumu v terénu, kde vše pozorujeme z malé výšky nad okolním terénem, je složité nebo minimálně velmi zdoluhavé utvořit si ucelený obraz o daném jevu na velké ploše. Avšak tvoříme-li mapu daného jevu, je vhodné snímky kombinovat s terénním průzkumem a doplnit je o lokální šetření jako jsou odběry vzorků nebo provedení kontrolních sond (Murdych 1985). Práce a studie, které kdysi vznikaly měsíce a roky na základě zdoluhavého objevování do té doby nepoznaných míst jsou již minulostí. Dnes stačí pouze satelitní snímek a do terénu se chodí jen za účelem ověřování nebo zpřesňování. Vývoj a kvalita nosičů a snímačů, stejně tak počítačů a výpočetního výkonu stále pokračuje rychlým tempem vpřed a tím se zvětšuje potenciál tohoto oboru a naskýtají se další možnosti jak a kde tyto informace využít.

3.1 Historie DPZ

DPZ je odjakživa přímo závislý na vývoji techniky. Vývoj se dá rozdělit na tři etapy. První etapa byla krátce po vynálezu fotoaparátu a následného snímkování z balónu nebo draků. Druhá etapa je spjata s pořízením snímků z letadla a třetí je pořízením snímků z družic. Tyto posuny v technice vždy silně ovlivnily následný vývoj DPZ (Čapek 1988). Nejsou to však jediné nosiče, které se pro snímkování používaly. Známé jsou také rakety, vzducholodě, poštovní holubi a v současnosti drony.

Pořídit první fotografii se podařilo v roce 1838 francouzským učencům J. N. Niepcovi a J. L. M. Daguerrovi. Krátce na to v roce 1849 byla zásluhou A. Laussedata, jenž upevnil fotoaparát na draka, pořízena první fotografie z oblohy. Následovaly první fotografie pořízeny z balónu. Tou první byla v roce 1958 fotografie Paříže a o dva roky později byl ze vzduchu zachycen i Boston. První fotografie z balónu na našem území byla pořízena v roce 1906. Na fotografii byla zachycena Praha. Experimentovalo se také s raketami, které vynesly fotoaparát do výše až 800 m, zde byla pořízena fotografie, následně se fotoaparát snesl zpět na zem pomocí padáku. Nejméně spolehlivé byly snímky pořízené kamerami s automatickou spouští upevňované na poštovní holuby (Čapek 1988).

V roce 1909 byla pořízena nedaleko Říma první fotografie z paluby letadla. I tak nadále přetrvávaly spíše snímky pořízené z balónů nebo vzducholodí. Kolem roku 1924 již existovaly první atlasy leteckých snímků, a to jak regionální, tak i všeobecně zeměpisné. Balón Explorer II pořídil v roce 1935 snímek z výšky 22,1 km, který pokrýval téměř 270 km² a stal se tak prvním snímkem dokládajícím zakřivení země (Čapek 1988). Za dalším vývojem DPZ stojí hlavně druhá světová válka a studená válka. Pořízené snímky byly důležitým strategickým nástrojem, jak vést válku a poskytovaly mnoho informací o protivníkovi. Pokroky v tomto odvětví však byly přísně tajné a uplatňovaly se zejména na špionážních letounech jako byly Boeing B-29, Lockheed U-2 nebo Lockheed SR-71 Blackbird.

Poslední etapou jsou snímky pořízené z umělých družic Země a kosmických lodí. První černobílý snímek z kosmu pořídila družice Explorer VI roku 1958. První barevné a tepelné snímky pocházejí z kosmických lodí Mercury, které byly vypouštěny od roku 1960. Od téhož roku byly do kosmu poprvé vyslány také meteorologické družice ze série TIROS (Čapek 1988).

Za důležité geografické / biogeografické milníky v historii DPZ můžeme označit roky 1956 – civilní využití infračervené fotografie pro detekci škod na vegetaci, 1958 – první fotografie zemského povrchu z družice, 1960 – první meteorologická družice, 1972 – ERTS (Landsat I) – první družice pro výzkum přírodních zdrojů, 1999 – IKONOS s širokým polem působnosti včetně zemědělství, lesnictví, kartografie a životního prostředí.

3.2 Stručný popis principu DPZ

Elektromagnetické záření definujeme jako „záření, které kromě energie nenese ani hmotu ani elektrický náboj“ (Čapek 1988). Toto záření je pak nositelem informací v dálkovém průzkumu. Množství energie vyzářené objektem M je přímo úměrné jeho teplotě T . Tak zní Stefan-Boltzmanův zákon (viz. rovnice 1).

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Stefan Boltzmanův zákon. M je celková intenzita záření [$W \cdot m^{-2}$], σ je Stefan Boltzmanova konstanta $5,670400 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$, T je termodynamická teplota [K].

Tento zákon také znamená, že každé těleso s nenulovou teplotou je zdrojem elektromagnetického záření (Kolář 2008). Toto záření může být emitované (vyzářené zdrojem), nebo odražené. Metody, při kterých využíváme přírodní elektromagnetické záření, označujeme za metody pasivní. Pokud pro vytváření snímku uměle emitujeme záření a po odrazu jej znovu zachytáváme, jedná se o metody aktivní.

Každý objekt odráží a emituje záření různých vlnových délek. Z vlastností tohoto záření určujeme druh látky nebo objektu a jeho okamžitý stav spolu se stavem jeho okolí. Každá látka má svůj typický způsob, jakým záření různých vlnových délek vyzařuje a odráží. Známe-li tento způsob odrazu a emise, jsme na základě této znalosti schopni určit, o jakou látku se jedná (Kolář 2008).

Záření na své cestě od zdroje do našich snímačů urazí značnou část cesty. Během této cesty dochází i k odrazům od objektů, nejvíce je však ovlivněno v prostředí zemské atmosféry. Zde dochází k pohlcení části energie atmosférou a také k jejímu rozptýlení do jiných směrů. Míra těchto jevů – absorpce a rozptylu – závisí na vlnové délce záření, na délce dráhy, kterou skrze atmosféru urazí (tloušťka sloupce atmosféry) a také na okamžitých vlastnostech atmosféry (teplotě, koncentraci plynů, obsahu pevných částic atd.). Tyto dva procesy nám značně ovlivňují naměřená data. Rozptyl zvyšuje hodnoty především kratších vlnových délek, při absorpci dochází k pohlcení energie některých vlnových délek. Důvodem jsou zejména molekuly oxidu uhličitého a vody. Interval, v němž dochází k pohlcování energie

určitých vlnových délek, jsou označovány jako absorpční pásy. Mezi těmito pásy leží místa tzv. atmosférická okna, která jsou pro elektromagnetické záření relativně dobře prostupná (Kolář 2008). Pro získání co nejpřesnějších dat je proto nutné na naměřených datech provést tzv. atmosférické korekce, aby se vliv těchto jevů minimalizoval.

3.3 Oblasti spektra používané v DPZ

Lidské oko je schopno zachytit jen zlomek celého elektromagnetického spektra, tzv. viditelné záření. Pro výzkum jsou užitečné i další vlnové délky, které jsou z historických i praktických důvodů rozděleny do několika spektrálních oborů (viz. Tabulka č. 2).

Tabulka č. 2: Spektrální obory dálkového průzkumu Země

Spektrální obor	Vlnový rozsah
ultrafialové záření (UV)	0,1 až 0,4 μm
viditelné záření (V)	0,4 až 0,7 μm
infračervené záření blízké (NIR)	0,7 až 1,4 μm
infračervené záření střední (SWIR)	1,4 až 3 μm
tepelné záření (TIR)	3 μm až 1 mm
mikrovlnné záření (MW)	1 mm až 1 m

Zdroj: Kolář 2008

Ultrafialové záření (0,1 až 0,4 μm)

Je velice škodlivé pro živé organismy, díky zemské atmosféře se ho dostává k povrchu jen malá část. Je vhodné pro vyhledávání ložisek zlata, monitorování ropných skvrn a v mineralogii (mnoho minerálů vydává charakteristické záření v těchto vlnových délkách). Též se používá k monitorování mocnosti ozonové vrstvy (Kolář 2008).

Viditelné záření (0,4 až 0,7 μm)

Nejvyužívanější část spektra, ve kterém funguje většina družicových systémů. Rozptýl má za následek ztrátu kontrastu v obrazové podobě dat. Horniny, minerály ani půda

nevytvářejí velké rozdíly v odraženém slunečním záření. Neprochází oblačností ani mlhou a lze ho snímat pouze ve dne (Kolář 2008).

Infračervené záření blízké (0,7 až 1,4 μm)

Dochází k menšímu rozptylu a pohlcení atmosférou, díky tomu je dosahováno větší ostroty i kontrastu. Voda se v těchto vlnových délkách chová téměř jako absolutně černé těleso (Kolář 2008).

Infračervené záření střední (1,4 až 3 μm)

Vhodné pro vegetační (odlišení druhů a zdravotního stavu vegetace) a geologické pozorování. Možnost odlišení ledu a sněhu a také druhů oblačnosti (Kolář 2008).

Tepelné záření (3 μm až 1 mm)

Slouží ke zjišťování povrchové teploty oceánů, mapování tepelného znečištění řek, jezer i samotné krajiny, radiační teploty a tepelné bilance povrchových objektů a vyhledávání lesních požárů (Kolář 2008).

Mikrovlnné záření (1 mm až 1 m)

Za vhodných podmínek může mikrovlnné záření proniknout i pod pevný povrch. Zeslabení vlivem počasí je u tohoto záření nejslabší. Nejvíce je rušeno za silného deště. Při použití pasivních metod je velice nízké prostorové rozlišení, jelikož intenzita přirozeně emitovaného mikrovlnného záření je nízká. Používá se hlavně v aktivních metodách (radar) pro získání dat ohledně reliéfu, plovoucího ledu, lesnictví, geomorfologie nebo zemědělství (Kolář 2008).

3.4 Spektrální vlastnosti půd

Půdní spektrum je výsledkem kombinace vnitřního spektrálního chování různých půdních složek. Odražené záření je reprezentováno půdní spektrální křivkou nebo jednodušeji půdním

spektrém. Žížala, Krása a kol. (2016, s. 18) definují půdní spektrum jako „soubor hodnot elektromagnetického záření, získaných pro všechna spektrální pásma. Tyto hodnoty se obvykle zobrazují jako hodnoty odrazivosti, tedy jako poměr intenzity odraženého záření od půdy a intenzity ozáření dopadajícího na povrch. Z praktických důvodů jsou hodnoty vyjadřovány jako relativní poměr vůči dokonalému odražeči měřeném pod stejnou geometrií a ve stejné pozici jako sledovaná půda“. Sluneční záření však nemůže proniknout hlouběji než 50 μm pod povrch půdy. Spektrální informaci tak nelze stáhnout na celý profil. S jistou mírou nepřesnosti můžeme určit vlastnosti půdy do cca 30 cm, a to na základě promísení orničního horizontu v důsledku orby. Pokud na půdu působí různé degradační faktory, dochází ke změnám půdních vlastností, které se následně promítají i do půdního spektra. Na základě této hypotézy a znalosti chování půdního spektra je možné pomocí DPZ sledovat erozní a degradační procesy (Žížala, Krása a kol. 2016).

„Všechny substance v půdní matici, které mají vliv na spektrální projevy půdy, jsou nazývány jako tzv. chromofory“ (Nassau 1980, cit v Žížala, Krása a kol. 2016, s. 19). Ben-Dor a kol. (1999, cit. v Žížala, Krása a kol. 2016, s. 19) definuje chromofory jako „chemické či fyzikální substance nebo parametry, které významně ovlivňují tvar a charakter výsledné spektrální křivky. Chromofory, které jsou aktivní při absorpci energie (např. chlorofyl) nebo její emisi (např. fluorescence) v konkrétních vlnových délkách jsou nazývány chemické chromofory. Chromofory, které ovlivňují tvar spektrální křivky (např. velikost částic či refrakční index) jsou nazývány fyzikálními chromofory“.

Z pohledu chemického složení jsou půdy složeny z mnoha různorodých komponent (voda, minerální složky a organická hmota), které mají různé spektrální projevy, nebo je nemají vůbec. Výsledná spektrální křivka půdy je superpozicí křivek všech jednotlivých chromofor. Vliv na křivku mají také faktory proměnné v čase nebo závislé na podmínkách pozorování (Žížala, Krása a kol. 2016).

3.4.1 Tvar spektrální křivky odrazivosti půd

Ve viditelném a blízkém infračerveném spektru (VNIR) spektrální křivka odrazivosti půd monotónně a pozvolna roste se zvětšující se vlnovou délkou, a to až k absorpčním pásmům vody na vlnových délkách 1400 nm a 2700 nm. V krátkovlnném infračerveném pásmu (SWIR) jsou spektrální charakteristiky ovlivněny spektrálními prvky hydroxylů, karbonátů, silikátů a vody. Největší vliv na snížení odrazivosti v tomto pásmu má organická hmota a půdní vlhkost.

Ve středněvlnném infračerveném pásmu (MWIR) může být v půdním spektru rozlišen vliv minerálů. I zde hraje při měření odrazivosti velkou roli obsah vody v půdě. Dlouhovlnné infračervené pásmo (LWIR) je ovlivňováno hlavně půdní vlhkostí, obsahem organické hmoty a velikostí jednotlivých zrn. V termální oblasti spektra začíná nad odraženým slunečním zářením převažovat vlastní vyzařování objektů. Toto emitované záření je poměrně vysoké a konstantní (Žížala, Krása a kol. 2016).

3.5 Faktory ovlivňující spektrální chování půdy

Při pořízení a analyzování pořízeného satelitního nebo leteckého snímku musíme uvažovat hned několik faktorů, které získaná data zkreslují vůči reálnému stavu. Mezi tyto faktory patří chemické chromofory (jílové minerály, uhličitany, organická hmota, voda a sloučeniny železa), fyzikální chromofory (vlhkost, půdní textura a morfologie povrchu), vegetace a rostlinné zbytky a také faktory, které ovlivňují sběr dat pomocí DPZ všeobecně. Mezi ně patří vliv atmosféry, geometrie snímání a zvolené prostorové, spektrální a radiometrické rozlišení (Žížala, Krása a kol. 2016).

3.5.1 Uhličitany

Uhličitany značně ovlivňují chemické půdní procesy, a to zřejmě nejvíce v oblasti kořenové zóny. U uhličitánů je aktivním chromoforem vazba C-O (v radikálu CO_3^-). Tato vazba umožňuje analýzu jejich obsahu ze spektrálních dat (Ben-Dor a kol. 1999). Pro popis C-O vazeb se využívá pásmo SWIR, kde hlavním regionem je vlnová délka 2336 nm. Další ale slabší absorpční pásy se nacházejí na vlnových délkách 2160, 1990 a 1870 nm (Stenberg a kol. 2010).

3.5.2 Organická hmota

„Tak jako půdní organická hmota hraje hlavní roli ve vztahu k mnohým chemickým a fyzikálním procesům v půdním prostředí, tak také významně ovlivňuje tvar a podstatu spektra půdní odrazivosti“ (Ben-Dor a kol. 1999). Existuje mnoho absorpčních pásů, díky kterým se dají pozorovat spektrálně aktivní organické sloučeniny jako jsou mimo jiné huminové

kyseliny (1929 a 1932 nm), celulóza (1370, 1725 a 2347 nm) a lignin (2050 a 2351 nm) (Viscarra Rossel a kol. 2006).

3.5.3 Voda

Voda je nejvíce aktivní v pásmech VNIR-SWIR, a to v závislosti na vibračním stavu skupiny O-H. V půdě se vyskytuje ve třech základních formách. Každá z těchto forem ovlivňuje odrazové spektrum jinak. Pokud je začleněna v mřížce některých minerálů (hydratační voda) projeví se absorpční pásy v okolí vlnových délek 1400 a 1900 nm. Druhou možností je voda absorbovaná na povrch jílových minerálů a humusových částic. Ta ovlivňuje celkovou odrazivost půd a působí jako fyzikální chromofor. Absorpční pásy se nacházejí na vlnových délkách 1400 a 1900 nm, slabší pak v okolí 950 a 1200 nm. Velice výraznou roli při odrazu světla od půdy hraje volná voda v pórech. Ta způsobuje pokles odrazivosti v celém rozsahu spektra zakrývá další možné vlivy absorpčních prvků (Žížala, Krása a kol. 2016).

3.5.4 Půdní textura a morfologie povrchu

Čím většími částicemi nebo agregáty jsou půdy tvořeny, tím méně odrážejí světla, a to v důsledku vícenásobných odrazů mezi nerovnostmi na povrchu. Obecně lze říci, že „se snižující se velikostí částic a půdních agregátů se zvyšuje odrazivost a snižuje se kontrast mezi absorpčními prvky“ (Atzberger 2002, cit. v Žížala, Krása a kol. 2016, s. 26). Drsnost povrchu je ovlivněna zrnitostním složením, velikostí a tvarem agregátů a v případě leteckého či satelitního snímkování hraje významnou roli (Cierniewski a kol. 2013). Je to dynamický faktor, který se na daném území může změnit během krátké časové periody. Tyto změny jsou způsobeny hlavně obděláváním půdy, srážkami, půdní erozí (vodní i větrnou) aj. Variabilita v drsnosti může být pozorována jak mezi jednotlivými pozemky v důsledku jiného způsobu obdělávání, tak i na území jednoho pozemku v závislosti na zrnitosti či velikosti půdních agregátů (Žížala, Krása a kol. 2016).

3.5.5 Vegetace a rostlinné zbytky

Prímé zakrytí nebo částečné ovlivnění výsledného spektra způsobuje vegetace nebo rostlinné zbytky na povrchu půdy. Pro získání co nejlepšího půdního spektra je vhodné snímkovat území

bez vegetace. Tato možnost se naskytá v jarním a podzimním období. Tj. v době před a krátce po zasetí a následně v době po sklizni a podmítce, případně před zasetím ozimních plodin. V ostatních částech roku může vegetace pokrývat až 100 % daného území. Problémem jsou však i zbytky vegetace pouze mělce zapracované do půdy (při užití bezorebných technologií) (Žížala, Krása a kol. 2016).

3.6 Využití DPZ v pedologii a biogeografii

DPZ nabízí širokou škálu uplatnění v mnoha vědních disciplínách. Vývoj nových technologií nebo zdokonalování těch stávajících, velmi ovlivňuje využití DPZ v jednotlivých odvětvích a umožňuje nám využívat tyto metody lépe, efektivněji a rozšiřuje i jejich uplatnění. Velký vliv na uplatnění má také prostorové rozlišení snímků, ze kterých jsme schopni vyčíst stále podrobnější informace. To se zlepšuje jak u družic, porovnáme-li například často využívanou družici Landsat 7 s družicí Sentinel 2, tak i v poslední době u velmi se rozšiřujících UAV (drony, RC modly) v kombinaci s kvalitními snímači, ze kterých je možné pořídit snímky s milimetrovým či vyšším rozlišením. To nám umožňuje jít z globální úrovně (měření teploty atmosféry, teploty oceánů, mocnosti ozonové vrstvy, monitoring mořského zámru aj.) na úroveň regionální (jednotlivých povodí, části menších států) nebo na úroveň lokální v případě UAV a věnovat se pouze malé vymezené oblasti.

3.6.1 Monitoring eroze

Eroze půdy je celosvětovou environmentální krizí dnešního světa, která ohrožuje jak přírodní prostředí, tak i zemědělské plochy. Půdy ubývá více než se myslelo, a to s sebou přináší nejen ekonomické škody (Patil a kol. 2015). DPZ je účinným nástrojem, jak tyto změny zachytit, dlouhodobě je monitorovat a pokusit se vymezit místa, kde je náchylnost k erozi vysoká. Na monitoring zemědělských ploch nebo říčních povodí, kde se monitorují i změny koryta před a po povodni vzniká mnoho studií. Nejčastěji používané metody pro modelování erozních jevů jsou modely USLE a RUSLE, ty pro výpočet své rovnice (viz. rovnice 2) používají proměnné, které jsou poměrně snadno odvoditelné z dat DPZ (Patil a kol. 2015; Zerihun a kol. 2018).

Pro výpočet je potřeba DEM (L a S), mapy land use / land cover (C a P), mapa půd (K) a mapa rozložení srážek (R). Z těchto rastrů se na základě výpočtu určí jednotlivé faktory a výsledný rastr znázorňuje závažnost poškození erozí (Zerihun a kol. 2018). Na základě těchto

map závažnosti postižení erozí se mohou efektivněji provádět protierozní opatření nebo vydávat případné výstrahy před hrozícími sesuvy.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

Rovnice RUSLE. A – průměrná roční ztráta půdy, R – faktor erozní účinnosti deště, K – faktor erodovatelnosti půdy, L – faktor délky svahu, S – faktor sklonu svahu, C – faktor vegetačního krytu a osevního postupu, P – faktor protierozního opatření.

3.6.2 Měření půdní vlhkosti

Přesná informace o vlhkosti půdy je důležitá pro mnoho oblastí, mimo jiné i zemědělství, meteorologii, hydrologii, předpověď extrémních jevů (sucha) a povodní (Zhuo, Han 2016). Zemský povrch vykazuje extrémní prostorovou a časovou variabilitu půdní vlhkosti. Půdní vlhkost řídí základní hydrologické procesy, jako je odtok, infiltrace a odpařování (Vereecken a kol. 2008). Hydrologické modely jsou vysoce citlivé na její změnu. Přesné měření by tedy mělo výrazně zlepšit a zpřesnit výsledky těchto modelů.

Měření půdní vlhkosti můžeme provést dvěma způsoby. In-situ nebo pomocí DPZ, kde již mnoho družic bylo vytvořeno právě za tímto účelem (Champagne a kol. 2016). In-situ data z terénního průzkumu, která jsou následně zpracovávána gravimetricky v laboratořích, jsou detailní (při správném postupu s minimální chybou měření) a pokud se vzorky odebírají sondáží, a ne pouze z povrchu, odhalí nám vlhkost v celém půdním profilu, a tudíž poskytnou více informací o celkovém množství vlhkosti v půdě. Takovéto zpracování je ale časově náročné, vezmeme-li v úvahu jak samotný výjezd do terénu, tak i procesy vysušování půdních vzorků atd. Další nevýhodou je, že měření je bodové a můžeme jej uvažovat jen v nejbližším okolí dané sondy.

Druhý typ měření je pomocí DPZ. Posledních dvacet let výzkumu DPZ ukázalo, že měření půdní vlhkosti může být do určité míry provedeno všemi oblastmi elektromagnetického spektra (Petropoulos a kol. 2015). Zejména pak techniky pomocí mikrovlnného záření mají velký potenciál v měření globální dynamiky půdní vlhkosti, protože mikrovlny mohou proniknout přes vrstvu vegetace, svrchní část půdy, a to zejména na nižších

frekvencích (Tabatabaenejad a kol. 2015). Vlhkost je ale možné pozorovat pouze do hloubky okolo 5 cm. Provázanost mezi hydrologickými modely a daty pořízenými z DPZ není ale příliš vysoká. Měřením z družic získáváme informace o vlhkosti pouze z povrchové vrstvy, zatímco hydrologické modely zvažují hloubku půdy daleko větší. Vědecké poznání v této oblasti je v zárodku a vyžaduje další studie pro lepší provázanost mezi daty a současně používanými hydrologickými modely (Zhuo, Han 2016). Dat tohoto typu je veliké množství, výzvou nyní je pochopit jejich možnosti a limity abychom je mohli rutinně používat v monitorovacích aplikacích a použít je k zachycení změn životního prostředí. Porozumění v této oblasti by znamenalo možnost propojit DPZ se studiem biogeochemických cyklů, které mají vliv na širokou řadu aplikací jako jsou předpověď počasí nebo klimatu, předpověď hydrologické povodně a předpovědi klimatických extrémů a rizik (Champagne a kol. 2016).

3.6.3 Precision agriculture

Precision agriculture (PA), česky (doslovný překlad) přesné zemědělství, je rychle se rozvíjející odvětví DPZ v oblasti zemědělství, především zásluhou snadno dostupných a poměrně levných dat získaných pomocí UAV. Datuje se od poloviny 80. let, kdy vznikly první senzory pro monitoring půdní organické hmoty (Mulla 2013). Zemědělství během několika posledních desetiletí přešlo přes éru mechanizace do éry informační. PA je způsob jak pomocí DPZ, geoinformačních systémů a informačních optimalizací efektivněji nakládat se zemědělskou půdou. Hnojit, zalévat a provádět změny nebo opatření proti škůdcům v ten správný čas na správném místě (Ge a kol. 2011).

Řada družic je dnes využívána pro tyto účely (viz. Tabulka č. 3) (Mulla 2013), jedná se ale o vysoké investice máme-li zájem o data s vysokým rozlišením a hustou frekvencí snímkování. Proto se stále větší pozornost začíná věnovat snímkování, kde nosičem je UAV ať už jde o drony nebo nejrůznější RC modely (Rokhmana 2015; Khanal a kol. 2017; Mulla 2013). V dnešní době se pro tyto účely používají vlnové délky od ultrafialové až po mikrovlnné části spektra. To nám přináší řadu pokročilých aplikací jako je fluorescenční spektroskopie, termální spektroskopie, LiDAR a další již tradiční aplikace ve viditelných a blízkých infračervených částech spektra jako jsou vegetační indexy (viz. Tabulka č. 4) (Mulla 2013; Chen a kol. 2014). Na základě těchto indexů, je možné spočítat širokou škálu vegetačních charakteristik. Je zde také provázanost mezi půdní vlhkostí a NDVI. Jakousi předpovědí budoucího vývoje NDVI byly úhrny srážek, ale ukázalo se, že stejný

potenciál pro predikci vývoje tohoto indexu má i půdní vlhkost změřená pomocí DPZ (Chen a kol. 2014).

Tabulka č. 3: Vybrané družice používané v přírodovědných oborech

Družice	Rok vypuštění	Spektrální pásma	Četnost snímání (dny)
AVHRR	1978	R, NIR, 2x TIR	18
SPOT 1	1986	G, R, NIR	2–6
IRS 1A	1988	B, G, R, NIR	22
IKONOS	1999	Panchromatické, B, G, R, NIR	3
Landsat 7	1999	Panchromatické, B, G, R, NIR, 2x SWIR, 2x TIR	8
Terra EOS ASTER	2000	G, R, NIR, 6x MIR, 5x TIR	16
QuickBird	2001	Panchromatické, B, G, R, NIR	1–4
RapidEye	2008	B, G, R, NIR	5,5
GeoEye	2008	Panchromatické, B, G, R, 2x NIR	2–8
WorldView-2	2009	B, G, R, NIR	1,1
Sentinel 2	2015	B, G, R, NIR, SWIR	5

B – modré pásmo, G – zelené pásmo, R – červené pásmo, NIR – blízké infračervené, MIR – střední infračervené pásmo, SWIR – krátkovlnné infračervené pásmo, TIR – tepelné pásmo (Mulla 2013).

Tabulka č. 4: Seznam vybraných vegetačních indexů

Index	Vzorec pro výpočet
NG	$G/(NIR + R + G)$
NR	$R/(NIR + R + G)$
RVI	NIR/R
GRVI	NIR/G
DVI	$NIR - R$
GDVI	$NIR - G$
NDVI	$(NIR - R)/(NIR + R)$
NDMI	$(NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$
GNDVI	$(NIR - G)/(NIR + G)$
SAVI	$1,5 * [(NIR - R)/(NIR + R + 0,5)]$
GSAVI	$1,5 * [(NIR - G)/(NIR + G + 0,5)]$
OSAVI	$(NIR - R)/(NIR + R + 0,16)$
GOSAVI	$(NIR - G)/(NIR + G + 0,16)$
MSAVI2	$0,5 * [2 * (NIR + 1) - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - R)}]$

G – zelené pásmo, R – červené pásmo, NIR – blízké infračervené pásmo (Mulla 2013).

4. Fyzickogeografický popis lokality

Studované území je zemědělsky využívaná plocha o rozloze 0,45 km² se souřadnicemi 14° 15' 37,52" v.d. a 50° 23' 45,13" s.š. Nachází se východně od obce Kleneč, která leží necelé dva kilometry jižně od Roudnice nad Labem. Geologické podloží je tvořeno sedimentárními horninami svrchní křídý (cenoman, spodní a střední turon) a je překryto kvartérními uloženinami (spraše, sprašové hlíny, fluvialní terasy). Geologické zlomy, poklesy a zdvihy zde způsobila saxonská tektogeneze (Merhautová 1999; Balatka, Sládek 1962).

Oblast leží v provincii České vysočina, subprovincie Česká tabule, oblast Středočeská tabule (viz. Tabulka č. 5) (Balatka, Sládek 1962). „Morfologie krajiny jest podmíněna tabulí křídovou, mohutným tělesem řípského čediče a pak erosivní činností Labe, Vltavy a Čepele“ Zahálka (1923). V pleistocénu, kdy Vltava tekla západně od Řípu se zde zachovaly soustavy říčních teras (Balatka, Sládek 1962), strže a erozní rýhy, které jsou intenzivními dešti modelovány dodnes. Nalezneme zde eolické sedimenty, které sem byly navátý větry Z až SZ směrů.

Tabulka č. 5: Geomorfologické členění zájmového území

Provincie	Česká vysočina
Subprovincie	Česká tabule
Oblast	Středočeská tabule
Celek	Dolnooharská tabule
Podcelek	Řípská tabule
Okrsek	Krabčická plošina
Podokrsek	Straškovská plošina
Část	roudnická část

Zdroj: Balatka, Sládek 1962

Studované území se nachází na straškovské terase (Balatka, Sládek 1962). Jedná se o písčitou terasu překrytou spraší a na ní vyvinuté černozemě (modální, karbonátové). Rovněž zde nalezneme regozemě arenické a koluvizemě. Půdní druh je spíše písčitý (zdroj: VÚMOP v.v.i.).

Jedná se o oblast relativně teplou s mírnou zimou. Průměrné roční srážky jsou 450 mm, kdy nejméně srážek spadne v lednu a únoru – 22 mm a nejvíce v červenci – 54 mm. Průměrná teplota je 8–9°C. Nejchladnější měsíc je leden (-2°C), nejteplejší srpen (18°C). Ročně je zde průměrně 100 mrazivých dní, 15–20 dní se sněžením a sněhová pokrývka vydrží

v průměru 40 dní (zdroj: Meteoblue.com/cs/). Quittova klasifikace řadí tuto lokalitu do skupiny teplých oblastí – W2 (Quitt 1971, cit. v Atlas podnebí Česka 2007, s. 237).

5. Metodika

Po zobrazení studovaného území (viz. Obrázek č. 1) na leteckých snímcích pouze v odstínech šedi (viz. Obrázek č. 2), bylo pro následné analýzy území rozděleno do tří kategorií. Místa tzv. tmavá a světlá které tvoří oba extrémy histogramu a zbytek pole spadl do kategorie prostřední tzv. středně tmavé neboli šedé (viz. Obrázek č. 3). Průběh histogramu je nevýrazný a nedají se z něho vyčíst jasné hranice mezi skupinami. Hranice těchto kategorií jsou nejasné a jsou určeny subjektivně a z tohoto důvodu jsou pouze tři. Bylo by možné definovat více skupin, určení jejich hranic by ale bylo mnohem subjektivnější. Při pohledu na černobílý snímek je poměrně jednoduché určit, které plochy se jeví světlé až bílé a které jsou naopak velmi tmavé až černé. Takto jsou vymezeny krajní intervaly a zbytek pole spadá do jedné, byť širší, skupiny. V úvahu připadá řízená nebo neřízená klasifikace snímku. Ta však nebyla použita, jelikož výstupy z ní jsou velmi nespojité a výsledné rozdělení je poněkud “skvrnité”. V takto vymezených kategoriích byla za pomoci softwaru ArcGIS® 10.6 a nástroje Hawth's Tool v programu ArcMap™ 10.6 vygenerována náhodná místa, ve kterých byly následně provedeny pedologické sondy.

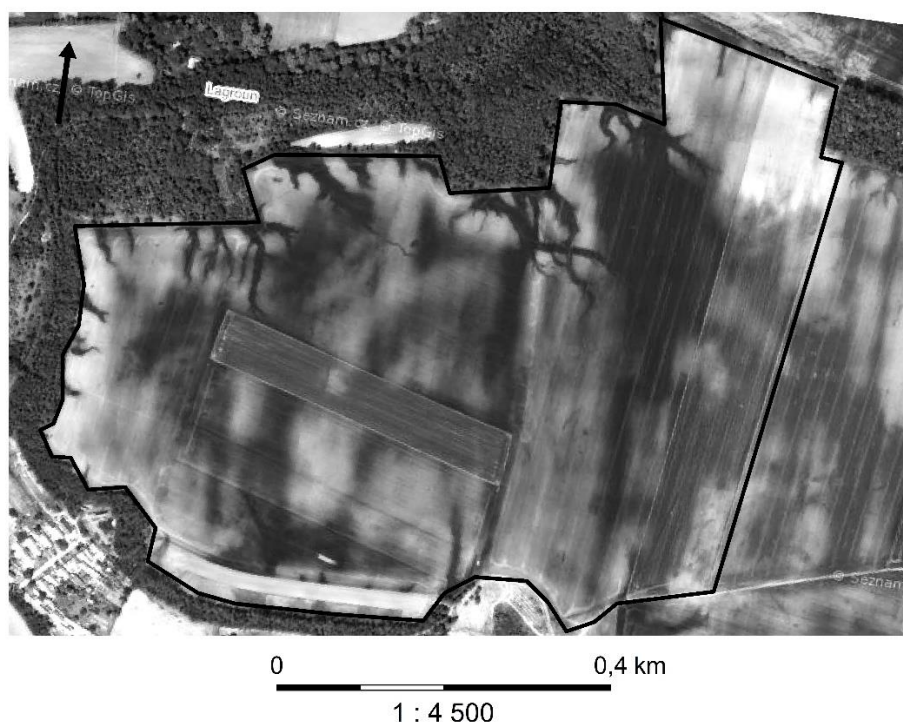
Obrázek č. 1: Zájmové území



Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

Data pro tuto práci byla získána mnoha způsoby. Terénním průzkumem místa, kde byly provedeny průzkumné pedologické sondy a odebrány vzorky půdy do Kopeckého válečků. Vzorky byly následně laboratorně zpracovány. Dále byly použity letecké (ČÚZK) a satelitní (Sentinel-2) snímky, DMR 5G (ČÚZK) pro odvození dalších charakteristik reliéfu a na základě satelitních snímků byly vypočítány indexy NDVI a NDMI. Zvoleny byly tyto indexy, jelikož index NDVI je pravděpodobně nejčastěji používaným indexem, jehož hodnoty se odvíjí od zdravotního stavu vegetace na základě obsahu chlorofylu, naproti tomu index NDMI počítá s půdní vlhkostí což je jev, který při zkoumání daného území hraje zásadní roli. Pro řešení tohoto tématu by se dozajista dalo jít do větších podrobností, daly by se použít vyspělejší metody a techniky. Nicméně tato práce, jak je zmíněno již v úvodu, byla pojata jako z pohledu běžného pedologa, který má ke své práci pouze snadno dostupné / neplacené zdroje a běžnou techniku. Každý si dnes může stáhnout satelitní snímky a zkoumat je. Dron s příslušnými senzory na podrobné snímání území však nevlastní každý, stejně tak vybavenou laboratoř na pokročilejší analýzy odebraných vzorků. Proto byly použity tyto metody.

Obrázek č. 2: Zájmové území v odstínech šedi.



Černá linie vymezuje hranice studovaného území. Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

Obrázek č. 3: Vymezené kategorie



Vytvořeno na základě mapového podkladu: Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

5.1 Terénní průzkum

Celkem se uskutečnily tři výjezdy na studované území. Pokaždé s lehce odlišným záměrem. První průzkum byl 2. 11. 2017, druhý výjezd následoval o dva týdny později 16. 11. 2017. Dodatečný třetí výjezd byl 13. 4. 2018.

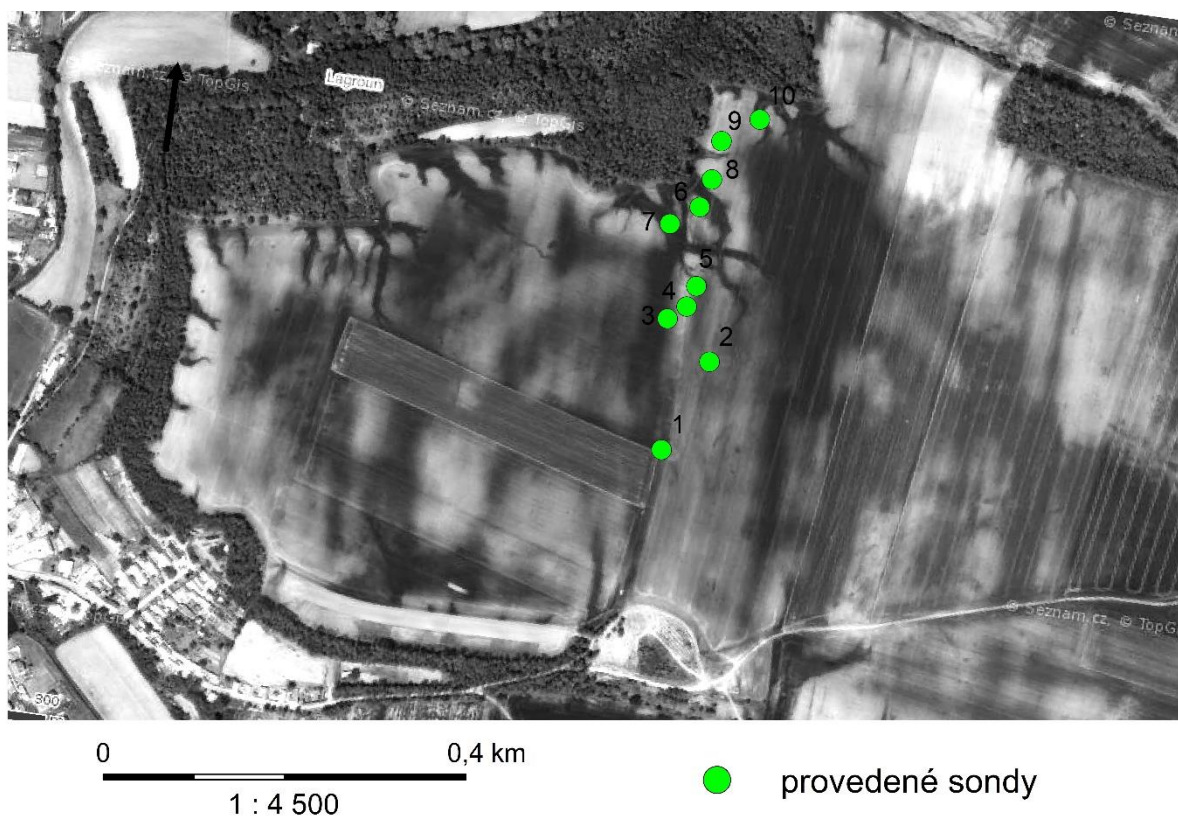
Při prvním výjezdu (2. 11. 2017) se jednalo čistě o průzkum daného místa, seznámení se s terénem a okolím. Teplota vzduchu byla 11°C, bylo polojasno až oblačno s občasnými lehkými přeháňkami. Nejbližší předchozí úhrn srážek před provedením pedologických sond byl 1. 11. 2017 (zdroj: Meteoblue.com/cs/). Daná část pole byla oseta řepkou, která dosahovala výšky od 10 do 40 cm. Celkem bylo provedeno deset pedologických sond (viz. Obrázek č. 4).

Při druhém výjezdu dne 16. 11. 2017 byly sondy provedeny v předem vytipovaných místech na základě rozdělení celého území do již zmíněných 3 kategorií. Celkem bylo provedeno osm sond (viz. Obrázek č. 5). Čtyři sondy v místech nejtmavších a po dvou sondách ve zbylých dvou kategoriích. Mimo pedologické sondy byly provedeny i odběry vzorků půdy do Kopeckého válečků. Vzorky se odebíraly u každé sondy ve dvou místech. Těsně pod povrchem a následně zhruba 20 cm pod povrchem. Teplota vzduchu byla 6°C,

bylo skorojasno s ranními mlhami. Nejbližší úhrn srážek před odebráním vzorků a provedením pedologických sond byl 12. a 13. 11. (zdroj: Meteoblue.com/cs/).

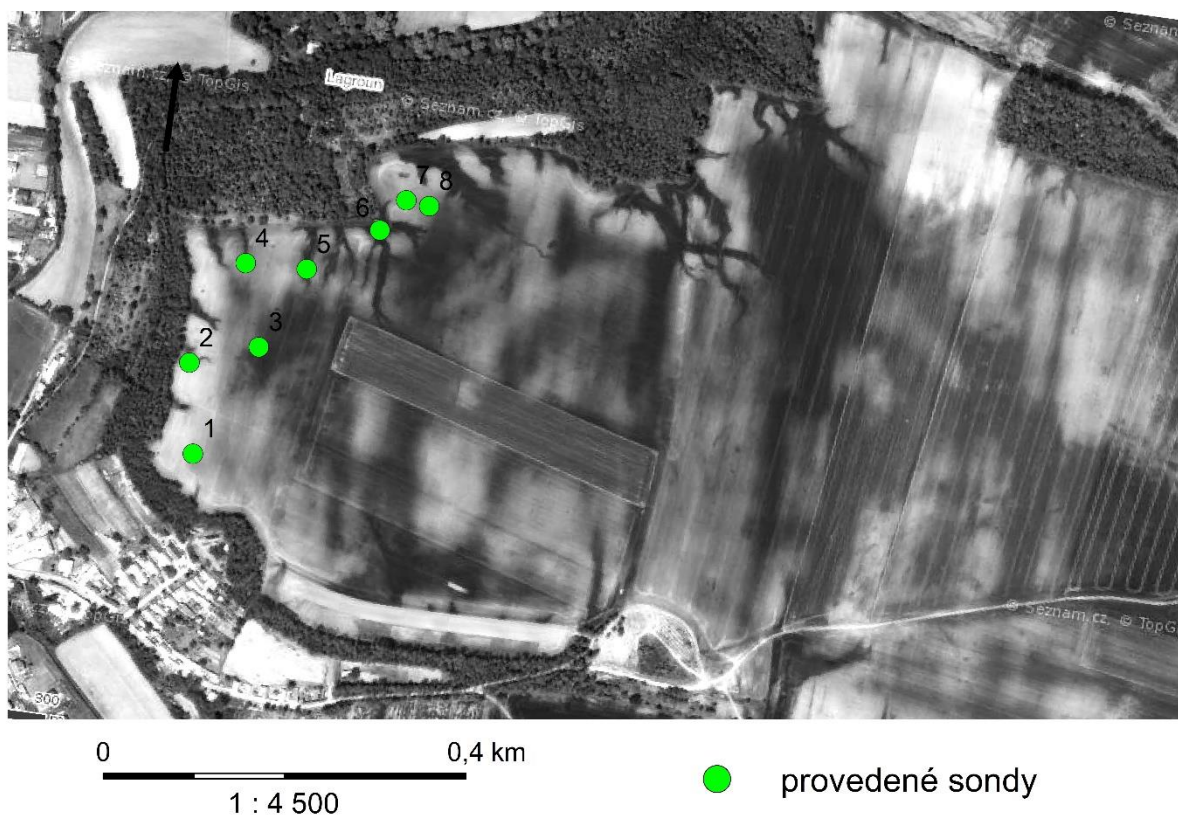
Třetí výjezd do terénu dne 13. 4. 2017 sloužil pouze k dotvoření představy o podobě půdního profilu kruhových míst (viz. Obrázek č. 6), nacházejících se v severovýchodní části pole a jejich odlišnosti od nejbližšího okolí. Teplota vzduchu byla 19°C, bylo zataženo s větrem kolem 30 m/s. Nejbližší úhrn srážek před provedením sond byl dne 11. 4., kdy se jednalo o pouhou přeháňku s přibližně desetinou milimetru srážek. O něco větší srážky byly dne 31. 3., i ty však byly pouze okolo jednoho milimetru (zdroj: Meteoblue.com/cs/). Pole tedy bylo velice vysušené.

Obrázek č. 4: Pedologické sondy, 1. terénní šetření



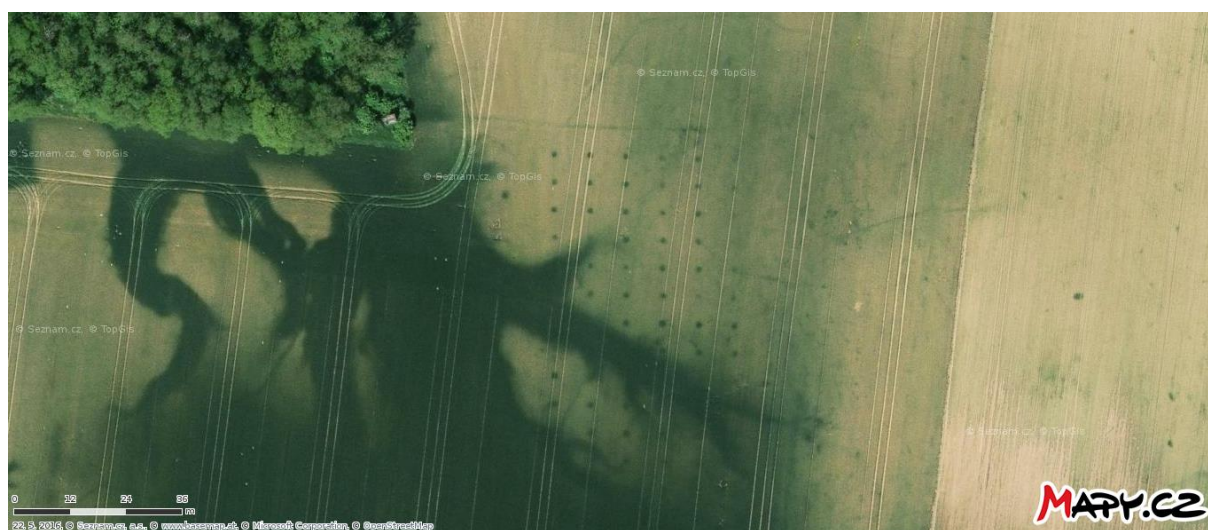
Mapový podklad: Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

Obrázek č. 5: Pedologické sondy, 2. terénní šetření



Mapový podklad: Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

Obrázek č. 6: Pravidelné kruhové útvary



Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

5.2 Pedologické sondy

Sondy sloužily k potvrzení několika předpokladů: 1. Potvrzení domněnky, že se jedná o říční terasu, což bylo následně potvrzeno i v rešeršní části (Balatka, Sládek 1962; Merhautová 1999). 2. Porovnání sond s mapami KPP a ověření výskytu daných půdních typů. 3. Potvrzení předpokladu, že daný jev způsobuje půdní vlhkost, a to na základě odlišné skeletovitosti a mocnosti půdy.

Podrobnější popis sond je možné shlédnout v příloze této práce. Hloubka sond se pohybovala od 50 cm do 1 m v závislosti na poloze podloží (říční terasy). Určovány byly hranice horizontů, jejich mocnost, barva, skeletovitost, půdní druh a půdní typ. Barvy byly určovány na základě Munsellovy tabulky barev.

5.3 Zpracování odebraných vzorků

Odebrané vzorky byly zpracovány v laboratoři ihned po návratu ze studovaného území. Důvodem byla snaha zachytit aktuální vlhkost, kterou vzorky obsahovaly. Postup zpracování vzorků byl převzat z knihy Praktikum vybraných ekologických metod (Suchara 2007). Ze vzorků se počítala okamžitá hmotnostní vlhkost (OHV), okamžitá objemová vlhkost (OOV), maximální vodní kapilární kapacita (MVKK) a objemová hmotnost (OH).

OHV je dána procenticky vyjádřeným poměrem hmotnosti vody k hmotnosti vysušeného vzorku, což znamená, že udává, kolik gramů vody připadá na vysušených 100g půdy. OOV je procentuální vyjádření objemu vody ve 100g odebraného vzorku. MVKK představuje procentuální vyjádření množství vody, které je neporušený půdní vzorek schopen pojmout procesem vzlínání a množství vody, které si udržel během odsávání. OH je hmotnost 1cm³ daného horizontu v původním neporušeném stavu (Kutílek 1978).

Vzorky byly nejdříve zváženy, tím byla zjištěna hmotnost čerstvého vzorku (G_m). Následně byly do větších misek umístěny dnem vzhůru Petriho misky obalené filtračním papírem. Kopeckého válečky byly spodní stranou umístěny na Petriho misky. Následně bylo dno velké misky zalito deionizovanou vodou tak, aby hladina dosahovala až těsně k okraji dna Petriho misek (viz. Příloha XIX). Takto byly vzorky syceny skrze filtrační papír po dobu 24 hodin. Po této době byly válečky na hodinu přeneseny na čtyři vrstvy nového suchého filtračního papíru, aby ze vzorků otekla voda, kterou si půda sama nedokáže udržet. Následně byly vzorky opět zváženy s přesností na 0,1 g (G_n). Poté byly válečky

po dobu 20 hodin a teplotě 105°C sušeny. Po vysušení a vychladnutí byly opět zváženy (G_s). V poslední řadě byly zváženy pouze válečky bez půdního vzorku (G_t). Označení válečků se skládá z číslice a písmena. Číslo uvádí pořadové číslo sondy, u které byl váleček odebrán, písmeno A značí odebrání vzorku pod povrchem, písmeno B odebrání vzorku ve 20 centimetrech.

Z těchto naměřených hodnot (viz. Tabulka 6) byly vypočteny příslušné charakteristiky (viz. Tabulka č. 7 a 8) za použití vzorců 3, 4, 5 a 6.

$$OHV = [(G_m - G_s)/(G_s - G_t)] * 100 \quad (3)$$

$$OOV = [(G_m - G_s)/100] * 100 \quad (4)$$

$$MVKK = [(G_n - G_s)/100] * 100 \quad (5)$$

$$OH = (G_s - G_t)/V \quad (6)$$

G_m – hmotnost čerstvě odebraných vzorků včetně válečku, G_s – hmotnost vysušených vzorků včetně válečku, G_n – hmotnost nasycených válečků včetně válečku, G_t – hmotnost válečku, V – objem válečku (Suchara, 2007). Výsledné jednotky jsou $[g_{(H_2O)} \cdot g_{(půdy)}^{-1}]$ pro OHV, $[g_{(H_2O)} \cdot cm^{-3}]$ pro OOV, $[g_{(H_2O)} \cdot cm^{-3}]$ pro MVKK a $[g_{(půdy)} \cdot cm^{-3}]$ pro OH. Za účelem procentuálního vyjádření byly OHV, OOV a MVKK vynásobeny stem.

Tabulka č. 6: Naměřené hodnoty z odebraných vzorků pomocí Kopeckého válečku

Označení válečku	Skupina	G_m [g]	G_s [g]	G_n [g]	G_t [g]
1A	šedá	300,2	258,5	292,7	96,6
1B	šedá	313,8	271,9	302,2	94,7
2A	tmavá	298,0	262,4	286,7	94,7
2B	tmavá	302,5	269,4	295,6	96,3
3A	světlá	303,5	277,6	291,3	101,3
3B	světlá	287,0	265,0	276,4	98,7
4A	tmavá	308,8	264,3	298,9	100,5
4B	tmavá	310,2	269,7	302,8	94,9
5A	tmavá	306,3	264,6	297,5	95,6
5B	tmavá	294,3	255,0	290,8	94,1
6A	tmavá	311,6	268,6	300,8	101,6
6B	tmavá	294,0	256,0	284,7	92,2
7A	světlá	302,5	263,7	289,4	97,1
8A	šedá	294,8	249,5	284,3	94,2
8B	šedá	307,2	262,6	297,2	96,8

G_m – hmotnost čerstvě odebraných vzorků včetně válečku, G_s – hmotnost vysušených vzorků včetně válečku, G_n – hmotnost nasycených válečků včetně válečku, G_t – hmotnost válečku, V – objem válečku (Suchara, 2007). Údaje jsou uvedeny v gramech. Sloupec Skupina označuje místo odebrání v zorku na základě skupin popsanych v kapitole 5. Metodika.

Tabulka č. 7: OHV, OOV a MVKK z naměřených hodnot v Tabulce č. 6

Označení válečku	Skupina	OHV %	OOV %	MVKK %	Hodnocení MVKK
1A	šedá	25,8	41,7	34,2	vysoká
1B	šedá	23,6	41,9	30,3	střední
2A	tmavá	21,2	35,6	24,3	střední
2B	tmavá	19,1	33,1	26,2	střední
3A	světlá	14,7	25,9	13,7	střední
3B	světlá	13,2	22,0	11,4	střední
4A	tmavá	27,2	44,5	34,6	vysoká
4B	tmavá	23,2	40,5	33,1	vysoká
5A	tmavá	24,7	41,7	32,9	vysoká
5B	tmavá	24,4	39,3	35,8	vysoká
6A	tmavá	25,7	43,0	32,2	vysoká
6B	tmavá	23,2	38,0	28,7	střední
7A	světlá	23,3	38,8	25,7	střední
8A	šedá	29,2	45,3	34,8	vysoká
8B	šedá	29,2	44,6	34,6	vysoká

OHV – okamžitá hmotnostní vlhkost, OOV – okamžitá objemová hmotnost, MVKK – maximální vodní kapilární kapacita. Sloupec – Skupina – označuje místo odebrání v zorku na základě skupin popsaných v kapitole 5. Metodika. Kritéria pro hodnocení MVKK jsou uvedeny v Tabulce č. 9.

Tabulka č. 8: Hodnoty OH a příslušné charakteristiky odvozené z těchto hodnot

Označení Válečku	Skupina	OH [g · cm ⁻³]	Strukturní stav humusového horizontu	Půdní druh
1A	šedá	1,619	nestrukturní	HP
1B	šedá	1,772	nestrukturní	P
2A	tmavá	1,667	nestrukturní	HP
2B	tmavá	1,731	nestrukturní	P
3A	světlá	1,763	nestrukturní	P
3B	světlá	1,663	nestrukturní	HP
4A	tmavá	1,638	nestrukturní	HP
4B	tmavá	1,748	nestrukturní	P
5A	tmavá	1,690	nestrukturní	HP
5B	tmavá	1,609	nestrukturní	HP
6A	tmavá	1,670	nestrukturní	HP
6B	tmavá	1,638	nestrukturní	HP
7A	světlá	1,666	nestrukturní	HP
8A	šedá	1,553	nevyhovující	PH
8B	šedá	1,658	nestrukturní	HP

OH – objemová hmotnost půdy. Sloupec – Skupina – označuje místo odebrání v zorku na základě skupin popsanych v kapitole 5 Metodika. Půdní druh PH – písčitohlinitý, HP – hlinitopísčité, P – písčité. Kritéria pro určení strukturního stavu humusového horizontu a půdního druhu jsou uvedeny v Tabulce č. 10 a 11

Tabulka č. 9: Kritéria a hodnocení MVKK

Kritérium objemové MVKK	Hodnocení MVKK	Vododržnost půdy
< 5 %	velmi nízká	velmi slabá
5-10 %	nízká	slabá
11-30 %	střední	střední
31-50 %	vysoká	silná
> 50 %	velmi vysoká	velmi silná

Zdroj: Suchara 2007

Tabulka č. 10: Strukturní stav humusového horizontu u středně těžkých a těžkých půd

Strukturní stav humusového horizontu	OH [g · cm ⁻³]
Výborný	< 1,2
Dobrý	1,2 – 1,4
Nevyhovující	1,4 – 1,6
Nestrukturní	1,6 – 1,8

Zdroj: Kutílek 1978

Tabulka č. 11: Kritéria určení půdního druhu na základě OH

Půdní druh	J	JV, JH	H	PH	HP	P
OH [g · cm ⁻³]	> 1,35	> 1,40	> 1,45	> 1,55	> 1,60	> 1,70

Půdní druh J – jíł, JV – jílovitý, JH – jílovohlinitý, H – hlinitý, PH – písčitohlinitý, HP – hlinitopísčitý, P – písčitý. Zdroj: Lhotský 1984

5.4 Analýza leteckých snímků

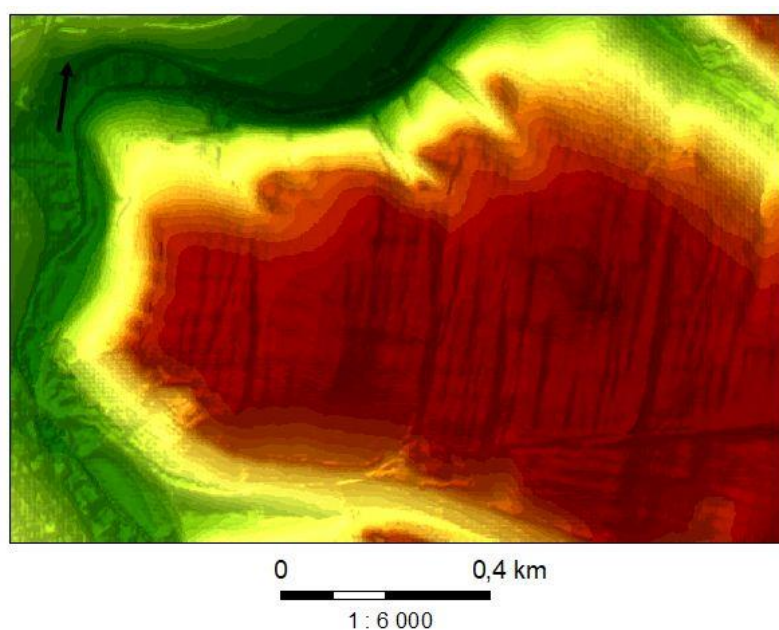
Zdrojem dat byl geoportál ČÚZK, portál mapy.cz a aplikace Google Earth Pro verze 7.3.1. Snahou bylo nalézt přesné datum pořízení snímku a na základě tohoto data dohledat, kolik dní před pořízením snímku spadly na dané území srážky, případně v jakém množství. Ty snímky, kde byla mozaikovitost dobře patrná, byly pro lepší názornost zobrazeny pouze v odstínech šedi a byly na nich vymezeny příslušné kategorie viz. kapitola 5. Metodika. Snímky byly porovnány mezi sebou, zdali je patrný nějaký vývoj dostupné časové řadě, dále byly porovnány s rastry odvozených z DMR a se satelitními snímky. Použité letecké snímky jsou přiloženy v příloze této práce.

5.5 Analýza DMR

Pro analýzu DMR byly použity LiDARové data DMR 5G, zapůjčené Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním, v podobě jednotlivých bodů v .xyz formátu. Pořízeny byly mapové listy Libochovice 0-3, Libochovice 0-4, Mělník 9-3, Mělník 9-4. Na jejich zpracování byl použit software ArcGIS® 10.6. V ArcMap™ 10.6 byly data zpracovány pomocí funkce Kriging (Spatial Analyst), kde do *Input point features* byly vloženy body ve formátu .txt, v *Z value data* byla vybrána možnost Z. V možnosti *Kriging method* byla ponechána možnost Ordinary, *Semivariogram model* byl nastaven na možnost Spherical a v poli *Output cell size* byla nastavena 1. Ostatní parametry nebyly měněny od přednastavené verze. Po kliknutí na tlačítko “OK“ se vytvořil rastrový model reliéfu s rozlišením 1x1 m, dále jen DMR, který byl vstupem pro další funkce (viz. Obrázek č. 7). Pro snadnější a rychlejší výpočet dalších výstupů byl tento DMR oříznut funkcí Extrakt by Mask (Spatial Analyst) na samotné studované území a jeho nejbližší okolí.

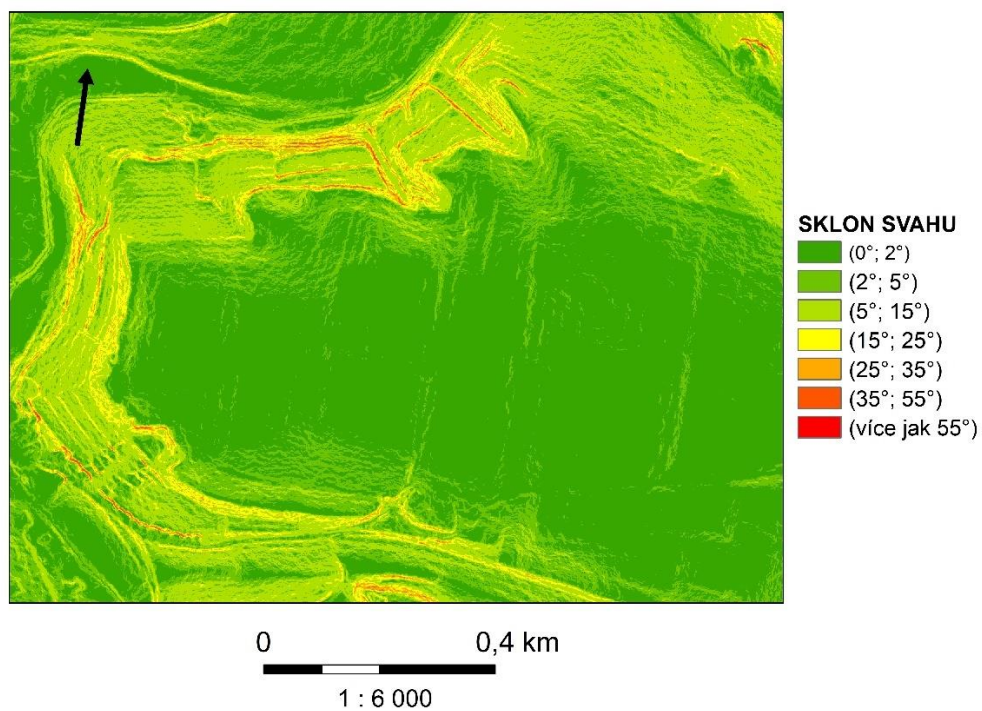
Další použitou funkcí byla funkce Slope (Spatial Analyst) pro vytvoření mapy sklonitosti (viz. Obrázek č. 8) sledovaného území. Jako vstupní rastr byl použit vytvořený DMR a všechny ostatní parametry byly ponechány tak jak jsou přednastaveny. Výsledný rastr byl rozdělen do těchto kategorií. Plochy rovinné (0°;2°), mírně sklonité (2°;5°), značně skloněné (5°;15°), příkře skloněné (15°;25°), velmi příkře skloněné (25°;35°), srázy (35°;55°) a stěny (více než 55°) (Demek 1985).

Obrázek č. 7: DMR vytvořený z LiDARových dat DMR 5G



Pro plastičtější vjem byla přidána funkce Hillshade. Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

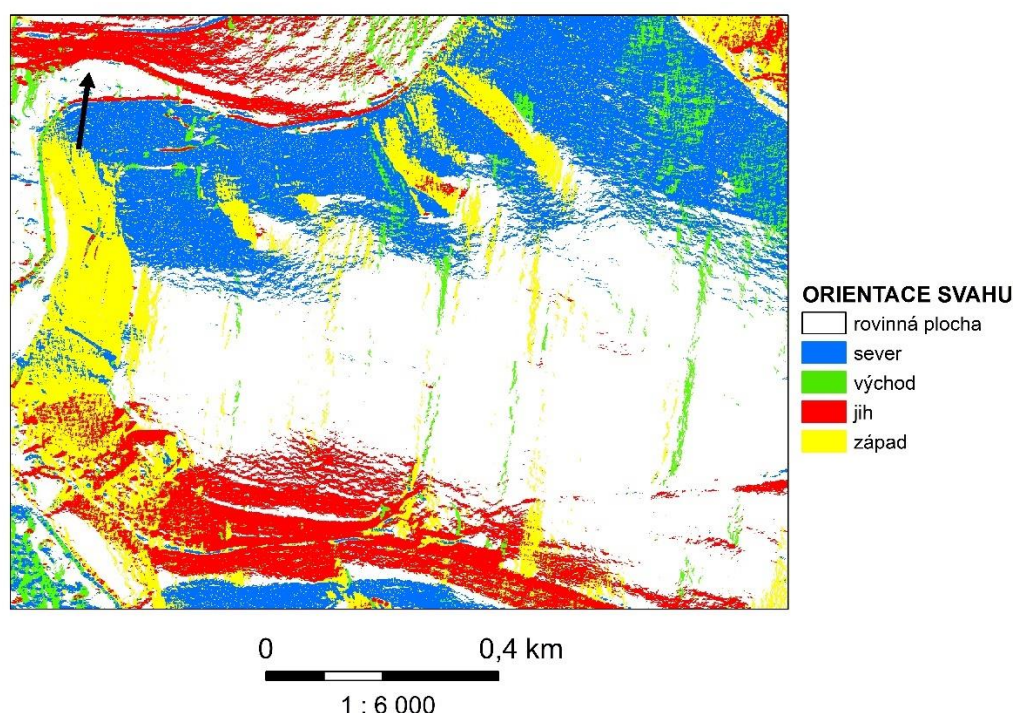
Obrázek č. 8: Sklonitost terénu



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Pro další analýzu byla použita funkce Aspect (Spatial Analyst) pro vytvoření mapy orientace svahů vůči světovým stranám. Jako vstupní data byl opět použit vytvořený DMR. Všechny ostatní parametry zůstaly nezměněny. Výsledný rastr byl rozdělen do 5 kategorií. Orientace směrem na sever (0° ; 45°), východ (45° ; 135°), jih (135° ; 225°), západ (225° ; 315°) a sever (315° ; 360°). Pro lepší názornost byl tento rastr poupraven na rastr zobrazující orientaci pouze svahů a byly z něho vyjmuty rovinné plochy (viz. Obrázek č. 9). K tomu byla použita funkce Reclassify (Spatial Analyst). Jako vstupní rastr byl použit vytvořený rastr sklonu. Pixelům se sklonem (0° ; 2°) byla přiřazena hodnota 0 a sklonům větším než 2° hodnota 1. Tento rastr byl následně použit ve funkci Raster calculator (Spatial Analyst) kde byl vynásoben s rastrem orientace svahů. Výsledný rastr byl rozdělen do šesti kategorií. Hodnoty nulové značící rovinu a hodnoty nenulové značící svahy orientované směrem na sever (0° ; 45°), východ (45° ; 135°), jih (135° ; 225°), západ (225° ; 315°) a sever (315° ; 360°).

Obrázek č. 9: Orientace svahů



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

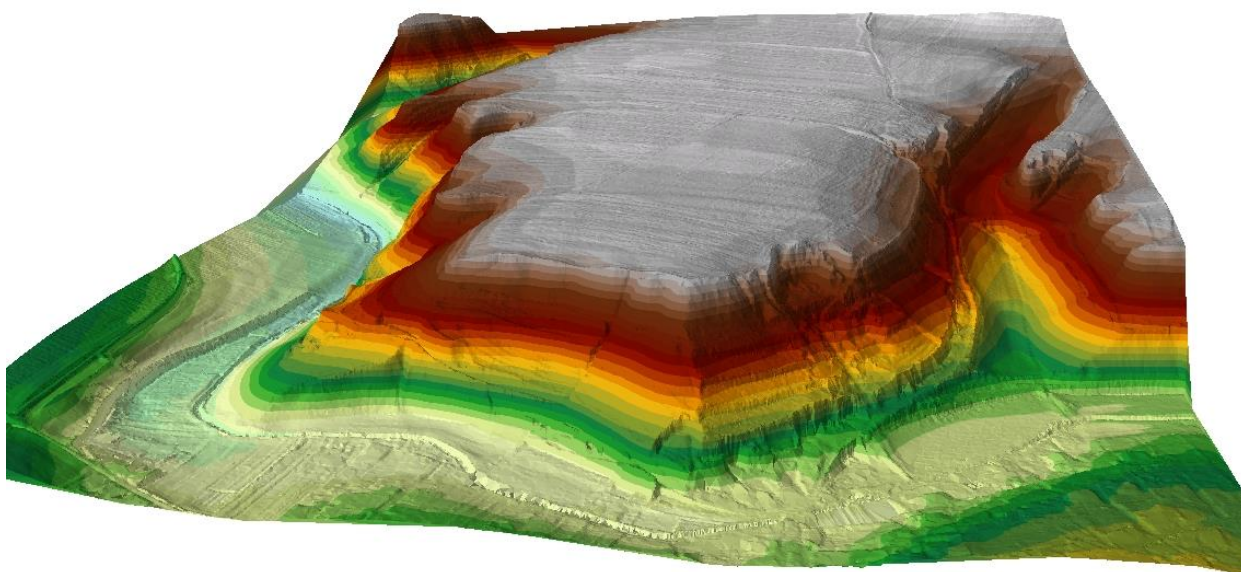
Pro vytvoření mapy zakřivení povrchu byla použita funkce Curvature (Spatial Analyst). Vstupní data tvořil opět rastr DMR. Ostatní parametry zůstaly nezměněny. Výsledkem jsou

tří rastrové vrstvy. Rastr zakřivení povrchu – curvature raster, rastr zakřivení povrchu ve směru sklonu svahu – profil curve raster a rastr zakřivení povrchu ve směru kolmo na sklon svahu – plan curve raster.

Na vytvoření stínového modelu reliéfu byla použita funkce Hillshade (Spatial Analyst). Vstupní data tvoří DMR, ostatní parametry zůstaly nezměněny od přednastavené verze.

V poslední řadě byl pomocí funkce Create TIN (3D Analyst) vytvořen TIN model. Vstupní vrstvu tvoří body, ze kterých byl v předchozích úkonech krigingem vytvořen DMR. Souřadnicový systém byl zvolen S-JTSK Krovak EastNorth. Ostatní parametry zůstaly nezměněny. Výsledný TIN byl následně zobrazen pomocí ArcScene™ 10.6 kde byl pro lepší znázornění pětkrát převýšen (viz. Obrázek č. 10).

Obrázek č. 10: TIN model



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

5.6 Analýza satelitních snímků

Použity byly satelitní snímky družice Sentinel-2 z let 2016 (srpen, září), 2017 (duben, červen) a 2018 (únor, duben). Snaha byla zachytit pole jak bez vegetace, tak s vegetací. Ke zpracování snímků byl použit software ArcGIS® 10.6. V prostředí ArcMap™ 10.6 byla použita funkce

Raster calculator, ve které byly spočítány indexy NDVI a NDMI dle vzorců uvedených v Tabulce č. 4. Výsledné rastry byly ještě oříznuty funkcí *Extract by Mask* pouze na sledované území. Nakonec byly tyto snímky pomocí funkce *Raster calculator* zprůměrovány, aby vznikl rastr, ve kterém budou odchylky jednotlivých rastru zhlazeny, a naopak budou vyzdvíženy místa, kde vyšší hodnoty převládají dlouhodobě. U každého snímku bylo dohledáno kolik dní před pořízením spadly nad daným územím srážky, případně v jakém množství. Výsledné rastry byly porovnány s daty shromážděnými z terénního průzkumu, s leteckými snímky a rastry odvozených z DMR.

6. Výsledky a diskuze

Při řešení této práce bylo nasbíráno mnoho dat, které následně musely být porovnány mezi sebou. V první řadě data z pedologických sond. Jejich podrobnější detail je přiložen v příloze této práce. Sond bylo provedeno pouze malé množství, pro utvoření si představy o proměnlivosti v rámci daného území v předem vytipovaných místech. Sloužily také k porovnání s mapami KPP, kde jsou na zájmovém území vymezené dva půdní typy. ČMk (černozem karbonátová) a DAČ (drnové půdy černozemní) dnes označované jako ČMa (černozem arenická a regozem v závislosti na hloubce humusového horizontu). Tyto půdní typy se zde opravdu nacházejí, jejich hranice jsou ale pestřejší, než je zaneseno v mapě čemuž odpovídá i mozaikovitost na leteckých snímcích. Jako příklad lze uvést území, kde by se měla vyskytovat černozem karbonátová. Při provedení sondy v blízkosti původní sondy zakreslené v mapě ji zde nalezneme (při kontaktu s desetiprocentní kyselinou chlorovodíkovou (HCl), díky obsahu karbonátů, šumí v celém svém profilu). Sonda provedená o několik metrů dále již ukazuje, že se o černozem karbonátovou nejedná a zakreslené území, přinejmenším v současnosti, již není přesné. Toto místo bylo nejspíše překryto transportovaným materiálem, kde se již karbonáty nevyskytují, jelikož při opětovném použití HCl se šumění ve svrchní části profilu neobjevilo. Tyto a další nepřesnosti pramení ze samotné metody vypracovávání těchto map, kdy se na základě jedné sondy určil areál, kde se daný půdní typ nachází. Vymezení hranic jednotlivých areálů bylo určeno na základě tvaru reliéfu, zkušeností daného pedologa a jiných proměnných. Proto je vhodné brát tyto mapy s rezervou a utvořit si na jejich základě pouze jakýsi zjednodušený přehled o sledovaném území, který je třeba si následně ověřit a zpřesnit terénním průzkumem.

Sond bylo provedeno pouze malé množství, a proto není možné z těchto dat vytvářet statistické výstupy, na které by bylo vhodné mít alespoň 50 sond. I přesto z těchto dat vyplývá fakt, že vymezené tři kategorie (místa tmavá, světlá a šedivá viz. Obrázek č. 3) se liší mocností a přítomností daných horizontů. V nejsvětlejších místech dosahuje horizont A mocnosti od 25 do 35 cm a ihned navazuje na podloží – štěrkovou terasu (viz. Obrázek č. 11). Vzhledem k hloubce orby na tomto poli, která se pohybuje okolo 30 cm, v těchto mělkých místech dochází k přiorávání této terasy do ornice, narůstá tak podíl písku vůči ostatním částicím a dále se tak mění vlastnosti této půdy v porovnání s okolím. V místech šedých se mocnost A horizontu pohybuje od 30 do 40 cm, následuje spraš mocná 5 až 25 cm, pod kterou se opět nachází štěrková terasa (viz. Obrázek č. 12). Místa nejtmavší tvoří A horizont mocný 40 až 80 cm, následovaný spraší o mocnosti do 20 cm (viz. Obrázek č. 13). V mělkých místech bylo možné se dostat až na písčitou terasu, v místech, kde byla mocnost A horizontu 80 cm již nebylo možné (s ohledem na vybavení) zjistit, v jaké hloubce se terasa nachází. Tyto zjištění ukazují, jak jsou jednotlivá místa schopná zadržovat vodu. Mělká místa, kde horizont A dosahuje maximálně 25 cm, nepojmou takové množství vody jako místa hlubší, s mocností až 80 cm. Odtok se urychlí i tím, že na mělké A horizonty okamžitě navazuje štěrková terasa, kudy voda snadno odteče do větších hloubek skrze prostor mezi zrny písku. Naopak v hlubších místech se pod A horizontem nachází několik centimetrů až desítek centimetrů spraše, která taktéž odtok vody do podzemí zpomalí. Sondy provedené v kruhových místech (viz. Obrázek č. 6) jasně ukázaly, jak velký vliv tyto odlišnosti v mocnostech horizontů mají. V době provedení těchto sond bylo velmi sucho, poslední úhrn srážek byl zhruba čtrnáct dní před sondáží. Pole bylo vyprahlé, rozpraskané a při silnějším závanu větru docházelo k přenosu svrchní části ornice saltací. Sonda provedená ve světlých místech s mocností A horizontu 30 cm byla vyprahlá v celém profilu, sonda provedená v jednom z těchto kruhových míst s mocností A horizontu 55 cm byla naopak v celém profilu vlhá.

Tento fakt je možné vyčíst i z analýz vzorků půdy odebraných Kopeckého válečky. Je třeba brát v potaz i chybu měření a nepřesnosti při odebírání vzorků, dozajista by také bylo lepší disponovat více vzorky, aby se jednoznačně dal vyslovit přesvědčivý závěr. Nicméně z výsledků MVKK je patrné, že vododržnost míst světlých je střední, míst šedých střední až silná a míst tmavých taktéž střední až silná. Z hodnot objemové hmotnosti vyplývá struktura daných vzorků, kdy světlá místa jsou spíše hlinitopísčítá až písčítá a tmavá a šedá místa spíše písčitohlinitá až hlinitopísčítá.

Obrázek č. 11: Sonda v místě spadající do kategorie – světlá místa



Zdroj: foto autora

Obrázek č. 12: Sonda v místě spadající do kategorie – šedá místa



Zdroj: foto autor

Obrázek č. 13: Sonda v místě spadající do kategorie – tmavá místa



Zdroj: foto autora

Mozaikovitost na leteckých snímcích z let 1946, 1949, 1954, 2001, 2004, 2007, 2010, 2013, 2015, 2016 a 2017 je dána dobou, kdy byl snímek pořízen. Přesněji dobou mezi posledními srážkami před pořízením snímku a samotným snímkováním. Pokud srážky spadly tentýž den, kdy bylo prováděno snímkování, nebo maximálně s odstupem dvou dnů, je na snímku vidět nasycenost vodou (pole se jeví tmavé) a místy se již povrch začíná lehce vysušovat (viz. Obrázek č. 14). Jeli odstup mezi srážkami a snímkováním 3-5 dní, pak je mozaika velmi dobře vyvinutá (viz. Obrázek č. 15).

Pokud však srážky na daném území nebyly více jak týden a panovalo teplé počasí, pole začíná být vysušováno celé a mozaikovitost pomalu mizí. Dále je na snímcích patrná změna před a po kolektivizaci, kdy se rozdrobené pozemky spojily do velkých, rozorali se meze, odstranily polní cesty a remízky. I to hraje svou roli v zadržování vody. Další jev, kterého je možno si všimnout je změna hranic a ploch lesa, které dnes obklopují pole. Tyto stromy mohou v určitých případech vytvářet jakýsi srážkový stín na okrajích pole, které je následně méně dotováno srážkami a rychleji vysychá. V poslední řadě byly pomocí leteckých snímků vysvětleny kruhové útvary (viz. Obrázek č. 6). Snímky z let 1946, 1949 a 1954 ukazují, že se v těchto místech nacházel sad (viz. Obrázek č. 16). Ten byl později zrušen, stromy byly

odstraněny i s kořeny a jámy byly zasypány nejspíše okolní černozemí. Tím zde vznikly A horizonty mocné 45 až 60 cm, zatímco ihned v okolí se hloubka A horizontu pohybuje kolem 30 až 35 cm.

Obrázek č. 14: Pole krátce po úhrnu srážek



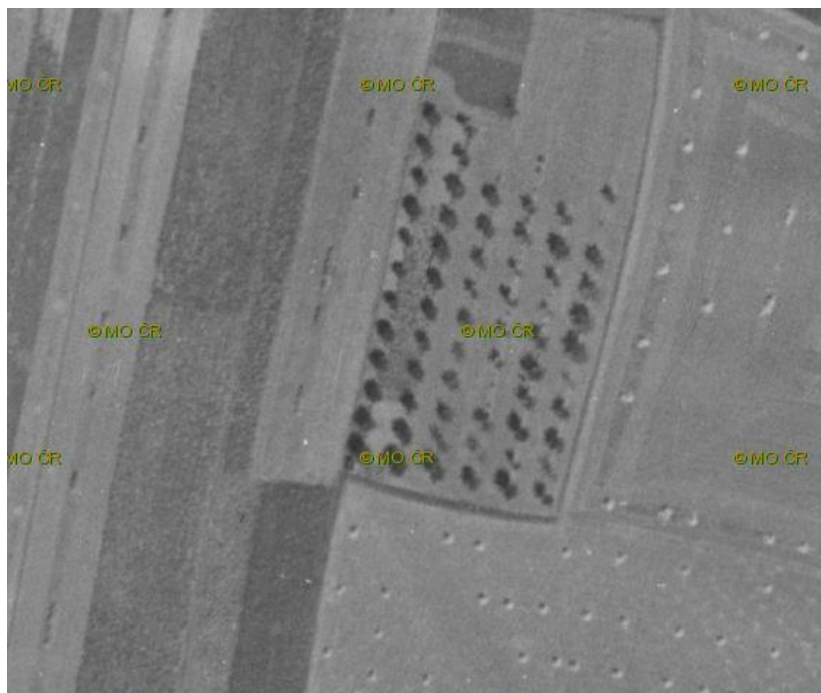
Ortofoto ČR 2010. Zdroj: Mapy.cz

Obrázek č. 15: Pole po kratším odstupu po srážkovém úhrnu



Ortofoto ČR 22. 5. 2016. Zdroj: Mapy.cz

Obrázek č. 16: Výřez snímku z roku 1949 s viditelným sadem



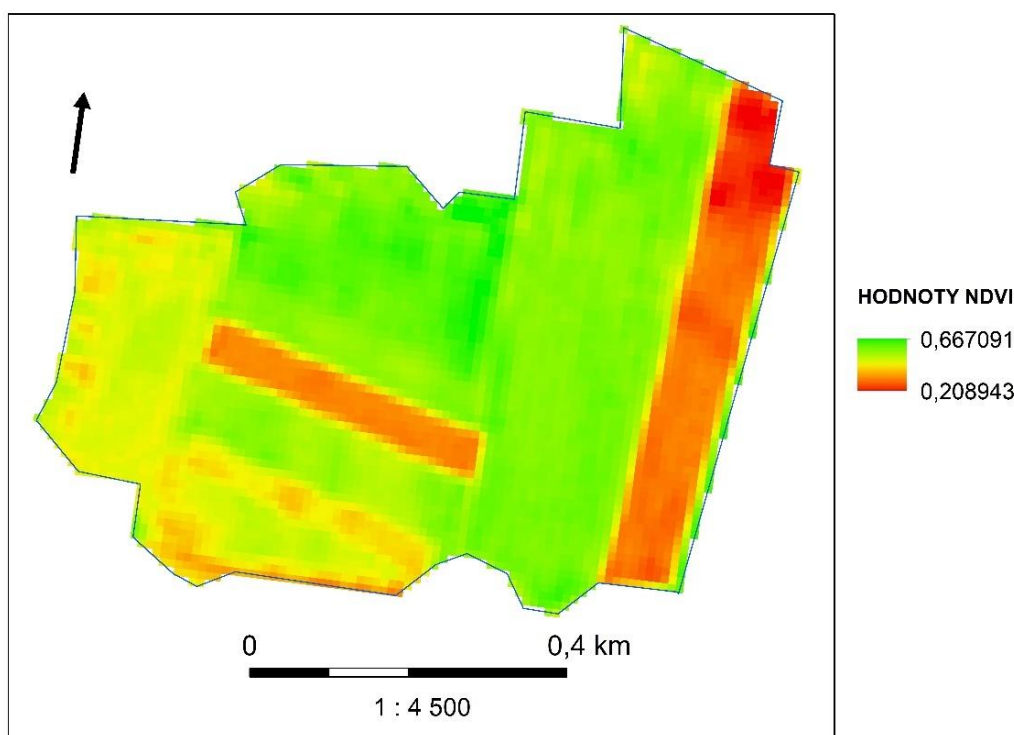
Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Satelitní snímky byly použity pouze z družice Sentinel-2 s prostorovým rozlišením 10 m (červené pásmo a blízké infračervené) a 20 m (krátkovlnné infračervené pásmo). Tyto snímky zatím netvoří dlouhou časovou řadu a na prodloužení této řady se nejvíce nabízí snímky z družice Landsat. Studovaný jev je však již na deseti a dvaceti metrovém prostorovém rozlišení špatně rozeznatelný a prostorové rozlišení 30 metrů by již bylo v tomto případě nevyhovující. Výsledky indexů NDVI a NDMI sami o sobě s takovým prostorovým rozlišením jaké mají v závislosti na vstupních datech mozaikovitost nějak výrazně nepostihují. Po vytvoření průměrného snímku NDVI a NDMI, které vzniknou zprůměrováním všech ostatních snímků, viz. kapitola 5.6 Analýza satelitních snímků, již můžeme v určitých místech pozorovat podobné útvary jako na snímcích leteckých, a to hlavně v západní části pole (viz. Obrázek č. 17). V porovnání NDVI a NDMI dopadá lépe NDVI, jelikož obě pásma použitá pro výpočet (NIR a RED) mají prostorové rozlišení 10 m. Pro výpočet NDMI byly použity pásma NIR a SWIR, kde SWIR disponuje prostorovým rozlišením 20 m, což se následně odráží i v méně detailních výsledcích.

Z DMR bylo odvozeno mnoho charakteristik, se kterými byly následně porovnávány letecké snímky a dané tři kategorie do kterých bylo sledované území rozděleno. Zájmové území

je však otevřená plocha, na kterou působí větrná a vodní eroze a povrch je zarovnaný a postupně denudován. Z tohoto důvodu nejsou na vytvořených datech vidět výrazné shody / korelace mezi DMR a získanými daty. Výjimkou je pouze mírně ukloněný okraj pole, kde se uplatňuje eroze a převažují zde místa bílá. Daleko přínosnější než povrch samotného území, by byl povrch oné říční terasy, která se nachází pod nánosem spraše a na ní vytvořeném A horizontu. V takovýchto datech, získaných například pomocí penetrometru nebo pedologických sond provedených v pravidelné síti, by korelace s leteckými snímky a ostatními daty měla být mnohem výraznější.

Obrázek č. 17: Zprůměrovaný index NDVI



Mapový podklad: Satelitní snímky Sentinel-2, scihub.copernicus.eu

Po získání všech těchto výstupů a porovnání jednotlivých dat mezi sebou je zřejmé, že za mozaikovitost zdejší půdy může rozdílná rychlost vysychání půdy, tzn. rozdílná vlhkost půdy na základě odlišných půdních vlastností. Tento fakt vyplývá z leteckých snímků, o něco méně je patrný i ze satelitních snímků a potvrzený je daty z terénního šetření. Ostatní studie se zabývají využitím DPZ zejména v problematice erozních jevů, hodnocení změn reliéfu po povodních a jiných extrémních událostech a v neposlední řadě řeší zdravotní stav vegetace. Územím o tak malé rozloze jako je studováno v této práci se zabývají jen některé

studie, a to v rámci Precision agriculture. Většina ostatních studií se odehrává na plochách jednotlivých povodí a větších. To bylo lehce limitující pro tuto práci, jelikož frekvence snímání daných míst na zemi sice stále roste, pro tyto potřeby je však stále nedostačující, uvažíme-li oblačnost, kvůli které je řada pořízených snímků nepoužitelná. Vhodným nástrojem na řešení těchto problémů by bylo využití UAV, které je pro studii takto malých ploch takřka nezbytné. Z důvodů popisovaných v úvodu této práce ale tyto metody využity nebyly.

Tato práce měla za cíl vysvětlit příčinu vybraného lokálního jevu a pokusit se odhadnout jeho případný budoucí vývoj. Je proto poněkud obtížné diskutovat výsledky s ostatními vědeckými pracemi, které se než monitoringem a vyhodnocováním takovýchto jevů zabírají spíše pokročilejším modelováním daných problémů za využití v tomto případě hydrologických nebo erozních modelů. V této práci se podařilo na základě znalostí, nasbíraných a vyhodnocených dat vysvětlit příčinu sledovaného jevu. Shromážděná literatura nabízí možnosti, jak tuto práci dále rozvíjet do větších detailů a dozvědět se více o vlastnostech půdy postižené tímto jevem.

Ge a kol. (2011) uvádí, že „multispektrální data se pro vyhodnocování vlastností půd nevyužívají, jelikož jsou příliš ovlivňována vlhkostí a drsností povrchu. Dnes se pro tyto účely využívá laboratorní spektroskopie na analýzu hyperspektrálních dat, ze kterých jsou vlastnosti půdy lépe patrné. Tato data však obsahují velké množství šumu a jsou obtížně zpracovatelná i ve vybavených laboratořích“. V této práci byla použita družice Sentinel-2, která poskytuje multispektrální data, a to právě za účelem zachycení půdní vlhkosti. Pro případné další studie vlastností zdejších půd, by však bylo vhodné využít dat hyperspektrálních. Zhuo a Han (2016) ve své studii popisují družice SMOS, fungující od roku 2009 a SMAP, fungující od roku 2015. Tyto družice jsou vytvořené za účelem monitorování půdní vlhkosti a salinity světového oceánu. Autoři popisují využití dat v hydrologických modelech (hlavně v modelu XAJ) a následném downscalingu z globální úrovně. Vzhledem k prostorovému rozlišení 25 až 30 km a následnému složitému downscalingu tato data nebyla použita. Pro takto extrémně lokální jev, studovaný v této práci nemají tato data význam. Chen a kol. (2014) ve své studii ukazují, že „existuje korelace mezi vlhkostí a NDVI, kde vlhkost předchází NDVI o jeden měsíc“. Pro svou práci použily družice Sentinel-2 a Landsat 7 pro získání většího objemu snímků za sledované období. Studie však probíhala v rámci území Austrálie, tudíž rozdíl v prostorovém rozlišení těchto družic nehrál podstatnou roli. V této práci byla použita pouze družice Sentinel-2 kvůli již zmiňovaným důvodům a podobných výsledků dosaženo nebylo, z důvodu nedostatku dat.

7. Závěr

Účelem této práce bylo vysvětlit za pomoci metod DPZ a ověřením těchto dat informacemi získanými z terénního šetření, mozaikovitost půd v okolí Roudnice nad Labem, a to na vybrané lokalitě u obce Kleneč. Použity byly letecké snímky, LiDARová data, snímky z družice Sentinel-2 a vlastní data získaná z terénního šetření.

Hlavním cílem této práce bylo vysvětlit mozaikovitost zdejších půd, vysvětlit její příčiny a možný budoucí vývoj. Na základě informací z leteckých a satelitních snímků, které byly porovnány s daty z terénního šetření se podařilo hypotézu – mozaikovitost zdejších půd je dána rozdílnou schopností půd dlouhodobě zadržovat vodu v důsledku odlišných půdních vlastností – potvrdit. Mozaika je viditelná pouze v obdobích po srážkách a je dána rozdílnou rychlostí vysychání půdy. Vzhledem k poloze studovaného území, kdy se jedná o otevřenou plochu, na kterou působí jak větrná i vodní eroze tak i jiné vlivy, se vývoj této lokality bude ubírat tím směrem, že budou ubývat tmavší místa, tedy ta, která si dokáží udržet vodu po delší čas. Je to dáno jak erozí, která odnáší svrchní materiál a zmenšuje tak postupně mocnost A horizontu, který je v porovnání s písčitou terasou schopen vodu udržet, tak i tím, že na mělkých místech dochází k přiorávání spodní terasy do A horizontu, čímž se zvyšuje podíl písku v půdě, který opět vede k horší vododržnosti půdy. Na druhé straně akumulace erodovaného materiálu mocnost A horizontu místy zvyšuje a lehce tak napomáhá ke zvyšování vododržnosti.

Vzhledem k dosaženým výsledkům se podařilo splnit i druhotný cíl práce, tj. ukázat, že je daná problematika uchopitelná i pro běžného pedologa, jenž nevlastní nejnovější vybavení a je tedy možné podobným způsobem ověřovat tyto jevy a jim podobné i na jiných lokalitách. Vhodné by bylo i další podrobnější zkoumání tohoto problému v podobě diplomové práce a více prozkoumat, jak tento jev působí na složení půdy a na vegetaci. Dle těchto informací lze i zefektivnit zavlažování v době sucha. Některá místa si dokáží poradit sama po delší dobu, jiná potřebují dodat vláhu daleko dříve, aby se na nich plodiny vyvíjeli stejně jako na místech s dostatkem vody. Významnou roli tento jev hraje také v degradaci půd, která začíná být vážným tématem po celém světě.

Letecké snímky a LiDARová data se ukázaly jako vhodný zdroj dat pro řešení této problematiky. Lehce limitující jsou snímky satelitní, a to zejména kvůli prostorovému rozlišení a v případě družice Sentinel-2 i zatím poměrně krátké časové řadě. Pro podrobnější zkoumání takto podrobných jevů je vhodné využít UAV.

Zdroje

- [1] ATLAS PODNEBÍ ČESKA (2007): *Climate atlas of Czechia* [Měřítko 1:2 000 000]. Praha: Czech Hydrometeorological Institute.
- [2] ATZBERGER, C. (2002): *Soil optical properties – A review*. Trier.
- [3] BALATKA, B., SLÁDEK, J. (1962): *Terasový systém Vltavy a Labe mezi Kralupy a Českým středohořím*. Praha: ČSAV. Rozpravy Československé akademie věd. Řada matematických a přírodních věd. 62 s.
- [4] BEN-DOR, E. a kol. (1999): *Soil reflectance*. In RENCZ, A. N., RYERSON, R. a kol. (1999): *Remote Sensing for the Earth Sciences*. 728 s. 111-188. ISBN 978-0-471-29405-4
- [5] CIERNIEWSKI, J. a kol. (2013): *Effects of Soil Roughness on the Optimal Time of Cultivated Soils Observation by Satellites for the Soils Average Diurnal Albedo Approximation*. IEEE Journal. 1194-1198
- [6] ČAPEK, R. (1988): *Dálkový průzkum Země: dočasná vysokoškolská učebnice*. 1. vydání. Praha: Ministerstvo školství ČSR. 244 s.
- [7] ČÚZK (2016): Historické ortofoto ČSR 1946, Historické ortofoto ČSR 1949, Historické ortofoto ČSR 1954, Ortofoto ČR 2001, Ortofoto ČR 2004, Ortofoto ČR 2007, Ortofoto ČR 2010, Ortofoto ČR 2013, Ortofoto ČR 2015, Ortofoto ČR 2016 a Ortofoto ČR 2017. Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz> (cit. 24. 4. 2018).
- [8] DEMEK, J. (1985): *Obecná geomorfologie*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství.
- [9] ESA (2000–2018): Satelitní snímky Sentinel-2. Mapový podklad. Sentinel online. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- [10] GE, Y. a kol. (2011): *Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review*. Front Earth Science. 5. 229-238
- [11] CHAMPAGNE, C. a kol. (2016): *Satellite surface soil moisture from SMOS and Aquarius: Assessment for applications in agricultural landscapes*. International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation. 45. 143-154
- [12] CHEN, T. a kol. (2014): *Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia*. Remote Sensing of Environment. 140. 330-338

- [13] KHANAL, S. a kol. (2017): *An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture. 139. 22-32
- [14] KOLÁŘ, J. (2008): *Principy fungování a využívání pozorovacích satelitů*. Praha: Czech Space Office. 62 s. ISBN 978-80-904163-5-2
- [15] KUTÍLEK, M. (1978): *Vodohospodářská pedologie*. 2. přeprac. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 295 s.
- [16] LHOTSKÝ, J. a kol. (1984): *Soustava opatření k zúrodňování zhutnělých půd*. Metodika ÚVTIZ, Praha.
- [17] MERHAUTOVÁ, R. (1999): *Geomorfologická analýza a vývoj reliéfu opuštěného údolí Vltavy na Řípské tabuli*. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha.
- [18] METEOBLUE (2006): Počasí Roudnice nad Labem - Meteoblue.com. Dostupné z: https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/p%C5%99edpov%C4%9B%C4%8F/t%C3%BDden/roudnice-nad-labem_%C4%8Cesko_3066727. (cit. 24. 4. 2018)
- [19] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ (2008): *Definice půdy*. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/\\$FILE/OOHPP_Definice_pudy-20080820.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/$FILE/OOHPP_Definice_pudy-20080820.pdf) (cit. 24. 4. 2018)
- [20] MULLA, D. J. (2013): *Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps*. Biosystems Engineering. 114. 358-371
- [21] MUNSELL, A. H. (2009): *Munsell Soil-Color charts*. Grand Rapids: Munsell Color.
- [22] MURDYCH, Z. (1985): *Dálkový průzkum Země*. 1. vydání. Praha: Academia. 142 s.
- [23] NĚMEČEK, J. a kol. (1990): *Pedologie a paleopedologie*. Praha: Academia. 546 s. ISBN 80-200-0153-0
- [24] NASSAU, K. (1980): *The causes of Color*. Scientific American. 243 s., 106-124
- [25] PATIL, R. J. a kol. (2015): *Remote Sensing and GIS based soil erosion assessment from an agricultural watershed*. Arabian Journal of Geosciences. 6967-6984
- [26] PETROPOULOS, G. P. a kol. (2015): *Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends*. Physics and Chemistry of Earth. 36-56
- [27] QUITT, E. (1971): *Klimatické oblasti Československa*. Brno: Geografický ústav ČSAV. Studia geographica. 82 s.

- [28] ROKHMANA, C. A. (2015): *The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia*. Procedia Environmental Sciences. 24. 245-253
- [29] SABINS, F. F. (1978): *Remote sensing: Principles and applications*. San Francisco, CA: W.H. Freeman.
- [30] SMOLÍK, L. (1957): *Pedologie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 399 s.
- [31] STENBERG, B. a kol. (2010): *Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science*. In Advances in Agronomy. 163-215
- [32] SUCHARA, I. (2007): *Praktikum vybraných ekologických metod*. Praha: Karolinum. Učební texty univerzity Karlovy v Praze. ISBN 978-80-246-1343-7
- [33] TABATABAEENEJAD, A. a kol. (2015): *P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second-Order Polynomial: First AirMOSS Results*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 53.
- [34] TOMÁŠEK, M. (2007): *Půdy České republiky*. 4. vydání. Praha: Česká geologická služba. 68 s. + 41 barevných příloh a mapa. ISBN 978-80-7075-988-1
- [35] VAŠKŮ, Z. (2008): *Půda je nenahraditelná*. <https://ekolist.cz/cz/publicistika/rozhovory/zdenek-vasku-puda-je-nenahraditelna> (cit. 24. 4. 2018)
- [36] VEREECKEN, H. a kol. (2008): *On the Value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review*. Water Resour Research. 44. W00D06
- [37] VGHMŮŘ DOBRUŠKA (2009): Historické Ortofoto ČSR 1954. Mapový podklad © Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. VGHMŮř Dobruška. Dostupné z: <http://www.mapy.army.cz/vghmur-dobruska> (cit. 24. 4. 2018)
- [38] VISCARA ROSSEL, R. a kol. (2006): *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. Geoderma. 131 s. 59-75
- [39] VÚMOP (2017): Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Komplexní průzkum půd. Online aplikace. Mapový podklad. Dostupné z: <http://kpp.vumop.cz/?core=account> (cit. 24. 4. 2018)
- [40] ZAHÁLKA, B. (1923): *O geologických poměrech okolí Roudnice a Řípu*. Praha: Státní geologický ústav ČSR. 25 s. + 1 mapa.
- [41] ZERIHUN, M. a kol. (2018): *Assesment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia*. Geoderma Regional. 83-90
- [42] ZHUO, L., HAN, D. (2016): *The Relevance of Soil Moisture by Remote Sensing and Hydrological Modelling*. Procedia Engineering. 1368-1375

- [43] ŽÍŽALA, D., KRÁSA, J. a kol. (2016): *Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země*. Certifikovaná metodika, VÚMOP, v.v.i., Praha.
ISBN 978-80-87361-63-4

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I: Sondy prvního terénního šetření	61
Příloha II: Sondy druhého terénního šetření	62
Příloha III: Letecký snímek území 19. 5. 2017	63
Příloha IV: Letecký snímek území 2015	64
Příloha V: Letecký snímek území 2. 7. 2015	64
Příloha VI: Letecký snímek území 17. 6. 2013	65
Příloha VII: Letecký snímek území 24. 8. 2011	65
Příloha VIII: Letecký snímek území 3. 7. 2010	66
Příloha IX: Letecký snímek území 11. 5. 2008	66
Příloha X: Letecký snímek území 13. 4. 2007	67
Příloha XI: Letecký snímek území 20. 5. 2005	67
Příloha XII: Letecký snímek území 31. 5. 2004	68
Příloha XIII: Letecký snímek území 2004	68
Příloha XIV: Letecký snímek území 2001	69
Příloha XV: Letecký snímek území 2001	69
Příloha XVI: Letecký snímek území 1954	70
Příloha XVII: Letecký snímek území 3. 5. 1949	70
Příloha XVIII: Letecký snímek území 1. 7. 1946	71
Příloha XIX: Popisované zpracování vzorků v kapitole 5.3 Zpracování odebraných vzorků .	71
Příloha XX: Průběh schnutí zájmového území I.	72
Příloha XXI: Průběh schnutí zájmového území II.	73
Příloha XXII: Průběh schnutí zájmového území III.....	74

Příloha I: Sondy prvního terénního šetření

Číslo sondy	Hloubka (v cm)	Označení horizontů	Barva dle Munsella (10 YR)
1	0 – 55	A	3/2
	55 – 65	AC	3/3
	65 a více	Ck	6/6
2	0 – 30	A	4/2
	30 – 35	AC	4/3
	35 – 45	Ck	6/4
	45 – 50	C I	6/5
	50 a více	C II	6/6
3	0 – 42	A	3/2
	42 – 60	AC	3/3
	60 – 70	Ck	3/4
	70 a více	C	7/4
4	0 – 24	A	3/3
	24 a více	C	6/8
5	0 – 31	A	2/1
	31 – 53	AC	4/4
	53 a více	C	7/4
6	0 – 25	A	2/2
	25 a více	C	6/6
8	0 – 50	A	3/2
	50 a více	C	2/1
9	0 – 19	Ap	3/2
	19 – 30	A	3/3
	30 – 45	A ₀	3/4
	45 – 70	C I	6/6
	70 a více	C II	7/6
10	0 – 20	Ap	4/2
	20 – 40	A	3/3

	40 – 84	A ₀	2/2
	84 a více	C	2/1

Příloha II: Sondy druhého terénního šetření

Číslo sondy	Hloubka (v cm)	Označení horizontu	Barva dle Munsella (10 YR)
1	0 – 25	Ap	3/3
	25 – 36	A	4/3
	36 – 39	AC	4/3
	39 – 56	C I	5/4
	56 a více	C II	5/6
2	0 – 30	Ap	2/2
	30 – 46	A	2/1
	46 – 56	A/C	3/3
	56 – 80	C I	5/6
	80 a více	C II	6/4
3	0 – 35	A	3/3
	35 – 54	C	5/6
4	0 – 33	Ap	2/2
	33 – 40	A	4/3
	40 – 65	C I	6/4
	65 a více	C II	5/8
5	0 – 58	A	3/2
	58 – 60	AC	7/4
	60 a více	C	5/6
6	0 – 35	Ap	2/2
	35 – 55	A	2/1
	55 – 80	AC	3/2
	80 a více	C	4/4
7	0 – 25	Ap	4/2

	25 a více	C	5/6
8	0 – 31	Ap	4/2
	31 – 35	A	4/2
	35 – 40	AC	8/4
	40 – 51	C I	5/6
	51 a více	C II	6/6

Příloha III: Letecký snímek území 19. 5. 2017



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha IV: Letecký snímek území 2015



Ortofoto ČR 21. 4. 2015. Zdroj: Mapy.cz

Příloha V: Letecký snímek území 2. 7. 2015



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha VI: Letecký snímek území 17. 6. 2013



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha VII: Letecký snímek území 24. 8. 2011



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha VIII: Letecký snímek území 3. 7. 2010



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha IX: Letecký snímek území 11. 5. 2008



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha X: Letecký snímek území 13. 4. 2007



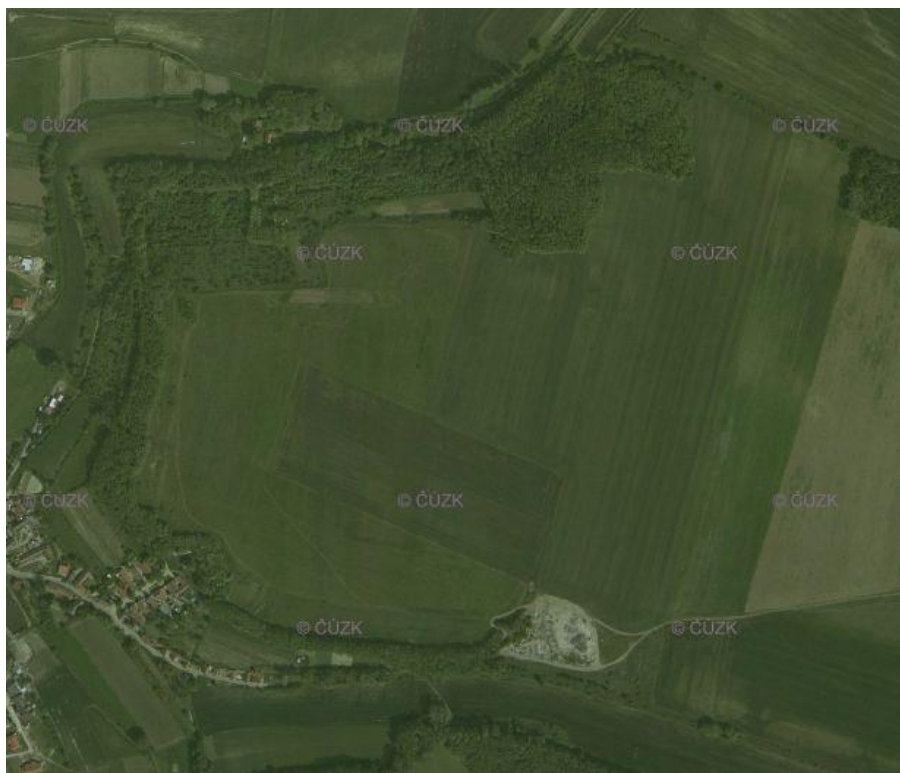
Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XI: Letecký snímek území 20. 5. 2005



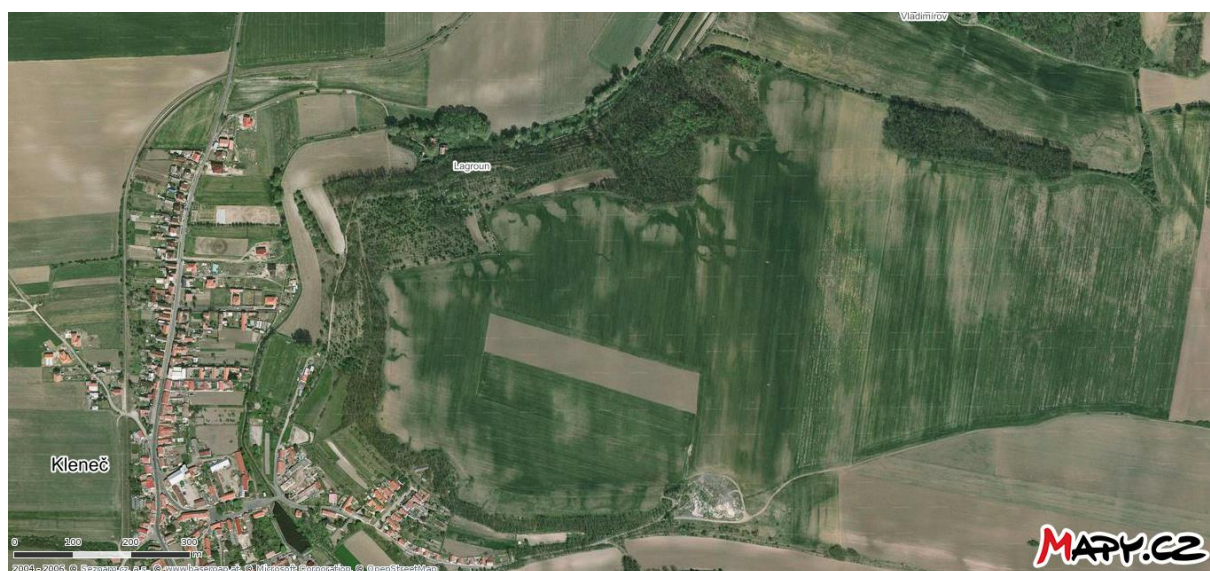
Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XII: Letecký snímek území 31. 5. 2004



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XIII: Letecký snímek území 2004



Ortofoto ČR 2004. Zdroj: Mapy.cz

Příloha XIV: Letecký snímek území 2001



Ortofoto ČR 2001. Zdroj: Mapy.cz

Příloha XV: Letecký snímek území 2001



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XVI: Letecký snímek území 1954



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XVII: Letecký snímek území 3. 5. 1949



Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XVIII: Letecký snímek území 1. 7. 1946



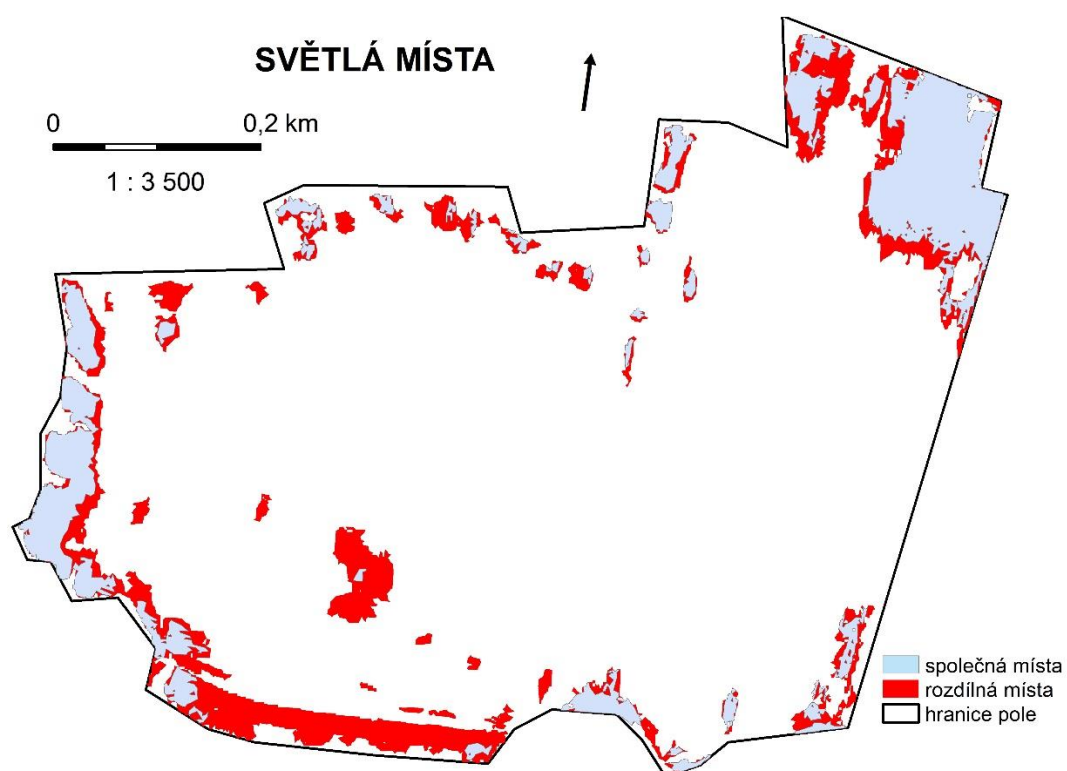
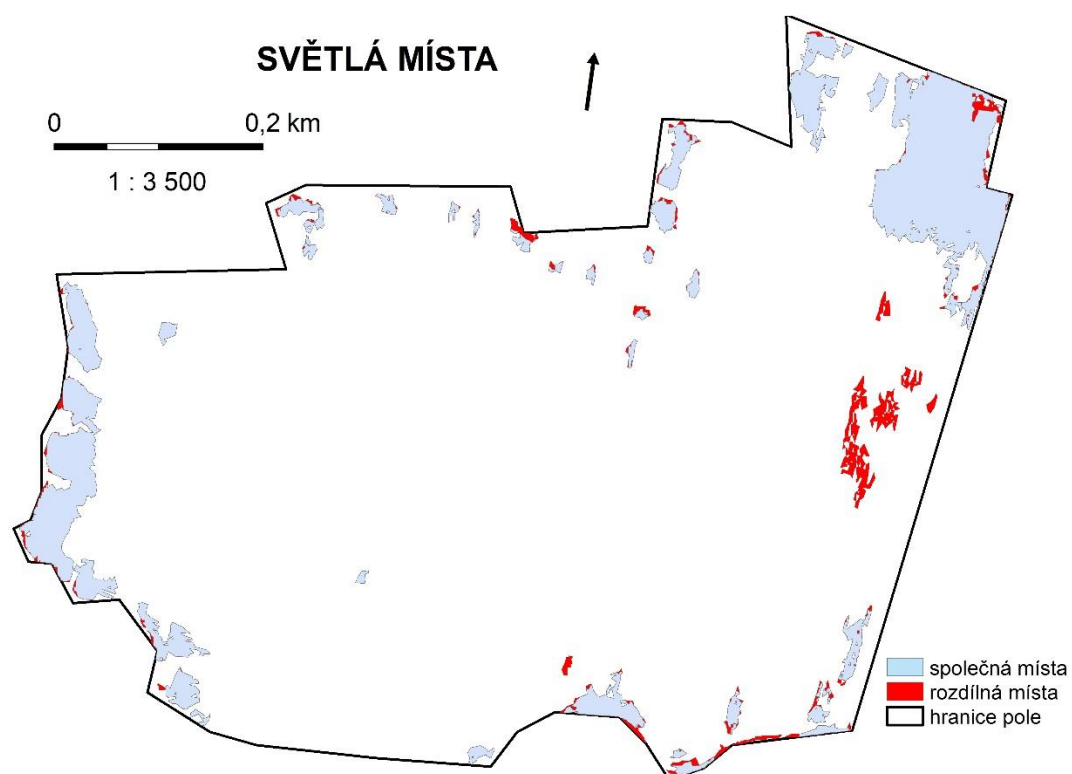
Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

Příloha XIX: Popisované zpracování vzorků v kapitole 5.3 Zpracování odebraných vzorků

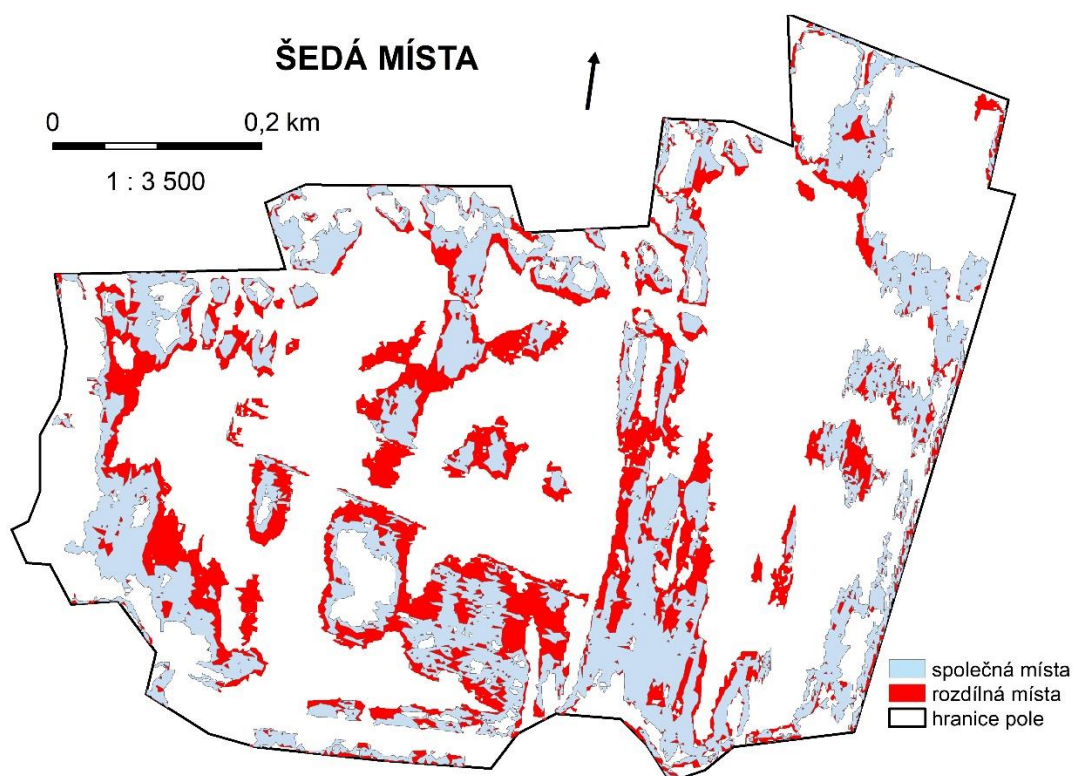
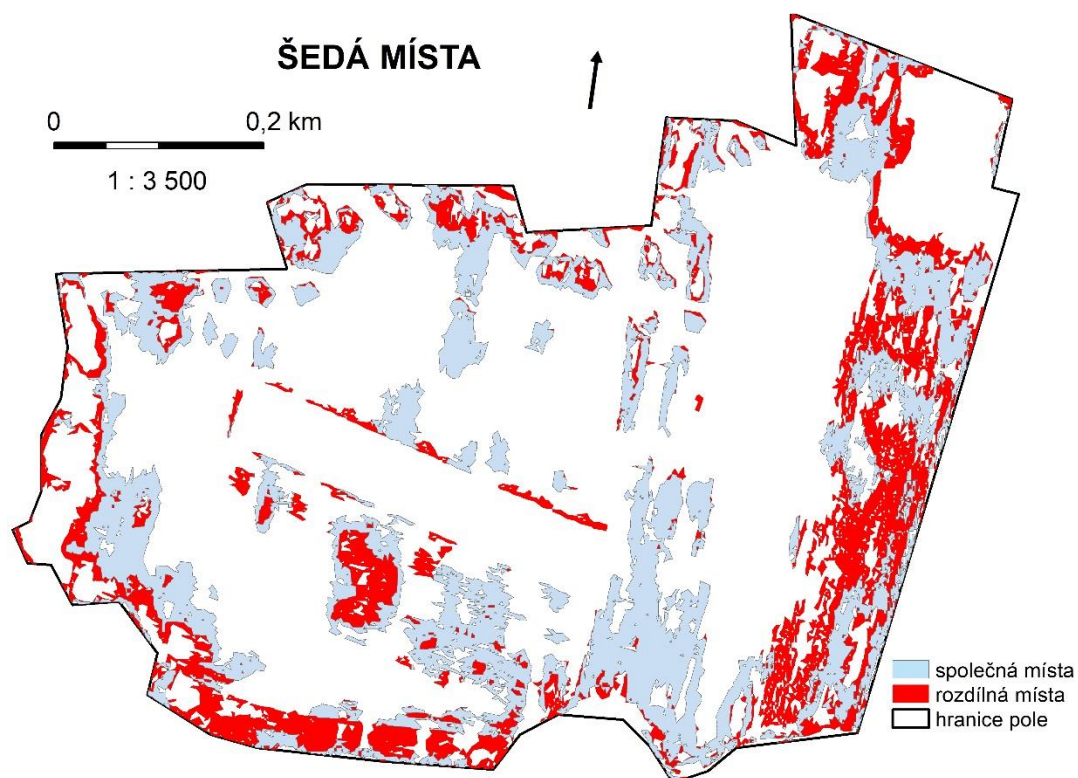


Zdroj: Foto autora.

Příloha XX: Průběh schnutí zájmového území I.

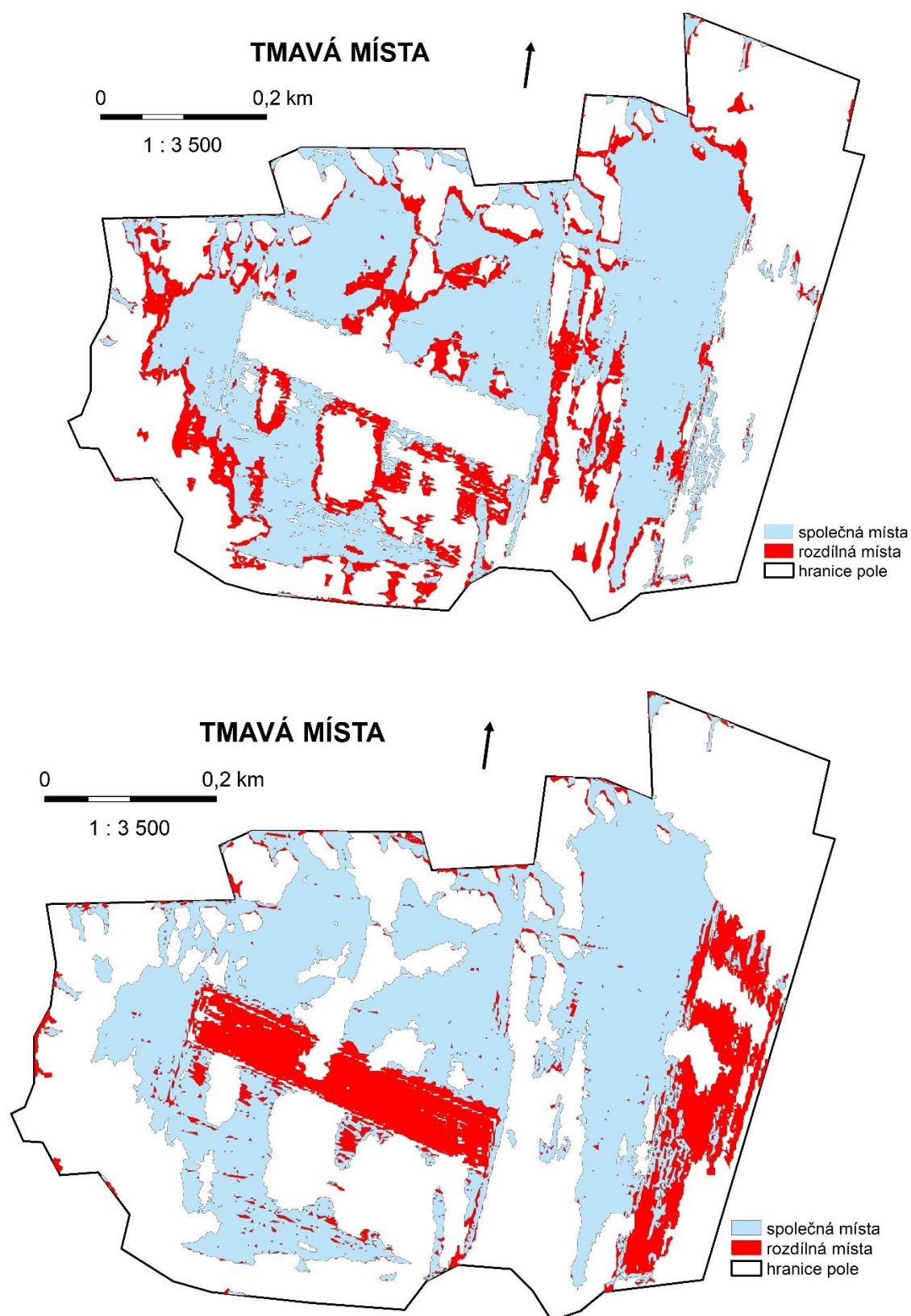


Mapy znázorňují průběh (směr) vysychání zájmového území, a to na základě snímků z roku 2004 a 2016, kdy doba mezi snímáním a posledním úhrnem srážek byla delší v roce 2004. Modrá barva znázorňuje plochy společné na obou snímcích, červená barva území téže kategorie (světlá) v příslušném leteckém snímku. Vrchní snímek je z roku 2004 spodní 2016.



Mapy znázorňují průběh (směr) vysychání zájmového území, a to na základě snímků z roku 2004 a 2016, kdy doba mezi snímáním a posledním úhrnem srážek byla delší v roce 2004. Modrá barva znázorňuje plochy společné na obou snímcích, červená barva území těže kategorie (šedá) v příslušném leteckém snímku. Vrchní snímek je z roku 2004 spodní 2016.

Příloha XXII: Průběh schnutí zájmového území III.



Mapy znázorňují průběh (směr) vysychání zájmového území, a to na základě snímků z roku 2004 a 2016, kdy doba mezi snímáním a posledním úhrnem srážek byla delší v roce 2004. Modrá barva znázorňuje plochy společné na obou snímcích, červená barva území těže kategorie (tmavá) v příslušném leteckém snímku. Vrchní snímek je z roku 2004 spodní 2016.